



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

GEORGE ANTONIO BELMINO DA SILVA

DECAIMENTO DE CLORO RESIDUAL LIVRE EM
RESERVATÓRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DA CIDADE
DE CAMPINA GRANDE - PB

Campina Grande

Agosto/2017

GEORGE ANTONIO BELMINO DA SILVA

DECAIMENTO DE CLORO RESIDUAL LIVRE EM
RESERVATÓRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DA CIDADE
DE CAMPINA GRANDE - PB

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Civil e Ambiental da Universidade Federal de
Campina Grande – UFCG, em cumprimento às
exigências para obtenção do Título de Mestre.

Área de concentração: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária

Orientadores: Prof. Dr. Rui de Oliveira

Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura

Campina Grande - PB

Agosto - 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- S586d Silva, George Antonio Belmino da.
Decaimento de cloro residual livre em reservatórios de distribuição de água da cidade de Campina Grande - PB / George Antonio Belmino da Silva. – Campina Grande, 2017.
72 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2017.
"Orientação: Prof. Dr. Rui de Oliveira, Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura".
Referências.
1. Água de Consumo Humano. 2. Degradação da Qualidade da Água. 3. Cinética do Cloro. 4. Simulação do Comportamento de Cloro Residual Livre. I. Oliveira, Rui de. II. Coura, Mônica de Amorim. III. Título.

CDU 628.1.033(043)

DECAIMENTO DE CLORO RESIDUAL LIVRE EM RESERVATÓRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE - PB

DISSERTAÇÃO APROVADO EM: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rui de Oliveira
Universidade Estadual da Paraíba – UEPB
Orientador

Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Coorientadora

Profa. Dra. Andrea Carla Lima Rodrigues
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Examinadora Interna

Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento
Universidade Estadual da Paraíba – UEPB
Examinadora Externa

Campina Grande - PB
Agosto - 2017

AGRADECIMENTOS

RESUMO

O objetivo deste trabalho é simular o decaimento de cloro residual livre em reservatórios de distribuição de diferentes capacidades e modos de operação do sistema integrado de abastecimento de água da cidade de Campina Grande, Paraíba. Foram determinados coeficientes cinéticos de decaimento com base em modelos de 1ª ordem, 1ª ordem paralela, 1ª ordem limitada e ordem n, sendo verificado que o modelo de 1ª ordem paralela apresentou o melhor ajuste e a melhor aplicação para o sistema. Para a simulação do comportamento do cloro residual livre foi empregado o *software* EPANET 2.0 considerando cenários construídos sobre diferentes abordagens de reações do desinfetante. Os resultados mostraram que, embora tenha sido verificada conformidade com a Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, mesmo para reservatórios em série e distantes do reservatório inicial de água tratada, o processo de degradação de cloro residual livre no sistema como um todo é intenso.

Palavras-chave: água de consumo humano, degradação da qualidade da água, cinética do cloro, simulação do comportamento de cloro residual livre.

ABSTRACT

The aim of this work is to simulate the decay of free residual chlorine in distribution reservoirs of different capacities and operation modes in the integrated water supply system of the city of Campina Grande, Paraíba state, northeast Brazil. Kinetic coefficients of chlorine decay were determined based on models of 1st order, parallel 1st order, limited 1st order and nth order. It was verified that the parallel 1st order model presented the best fit and application for the system. For the simulation of free residual chlorine behavior, EPANET 2.0 software was used, considering scenarios constructed on different approaches of disinfectant reactions. Results showed that, although it was verified compliance with the standards of Brazilian Ministry of Health Ordinance 2914/2011, even for reservoirs in series and distant from the initial treated water reservoir, the process of free residual chlorine degradation in the system as a whole is intense.

Keywords: water for human consumption, degradation of water quality, chlorine kinetics, simulation of free residual chlorine behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema geral de um sistema de abastecimento de água	13
Figura 2 – Sistema de abastecimento de água de Campina Grande	15
Figura 3 – Zonas de Pressão da rede de distribuição de água de Campina Grande	17
Figura 4 – Reservatórios em relação ao terreno	19
Figura 5 – Níveis operacionais de reservatórios.....	21
Figura 6 – Estimativa da velocidade de subida do nível de água	22
Figura 7 – Efeito do pH nas quantidades relativas de HOCl e OCl ⁻ a 25°C	27
Figura 8 – Reações de decaimento do cloro numa tubulação de ferro.....	29
Figura 9 – Comportamento dos segmentos utilizando o método Lagrangeano time-driven, tempo t (a) e tempo t + Δt (b).....	34
Figura 10 – Etapas metodológicas da pesquisa	35
Figura 11 - Localização dos reservatórios R9, R5 e R4	36
Figura 12 – Reservatório R9	37
Figura 13 – Reservatório R5	38
Figura 14 – Reservatório R4	38
Figura 15 – Coleta de água na saída dos reservatórios R9 (a), R5 (b) e R4 (c).....	40
Figura 16 - Método titulométrico DPD - SFA	40
Figura 17 – Termômetro infravermelho modelo CEM DT – 8867H tipo K 3002F	41
Figura 18 – Boletim diário do SAACG	41
Figura 19 – Modelo do sistema construído no EPANET 2.0	42
Figura 20 – Padrão do comportamento do nível de água no R0	43
Figura 21 – Boletim diário controle físico-químico.....	44
Figura 22 – Curva de volume com relação à geometria do R9.....	44
Figura 23 – Curva de volume com relação à geometria do R5.....	45
Figura 24 – Curva de volume com relação à geometria do R9.....	45
Figura 25 – Padrão de consumo no nó - Zonas de Pressão A, D e carros-pipas.....	47
Figura 26 – Padrão de consumo no nó - Prata e R2	47
Figura 27 – Padrão de consumo no nó - Zona de pressão C.....	47
Figura 28 – Método para a determinação da constante cinética de decaimento no seio da água.....	49
Figura 29 – Monitoramento das concentrações de CRL no R9	51
Figura 30 – Monitoramento das concentrações de CRL no R5.....	51
Figura 31 – Monitoramento das concentrações de CRL no R4.....	52

Figura 32 – Teste da garrafa no reservatório R9, na Fase I.....	53
Figura 33 – Teste da garrafa para o reservatório R5, na Fase I.....	53
Figura 34 – Teste da garrafa para o reservatório R4, na Fase I.....	53
Figura 35 – Teste da garrafa para os reservatórios R9, R5 e R4, na Fase II	54
Figura 36 – Decaimento do cloro residual livre na água do reservatório R9	55
Figura 37 – Decaimento do cloro residual livre na água do reservatório R5	56
Figura 38 – Decaimento do cloro residual livre na água do reservatório R4	56
Figura 39 – Decaimento do cloro no reservatório R9, Fase II	58
Figura 40 – Decaimento do cloro no reservatório R5, Fase II	59
Figura 41 – Decaimento do cloro no reservatório R4, Fase II	59
Figura 42 – Gráfico típico do ponto de inflexão	61
Figura 43 – Perfil temporal para as concentrações de CRL para o Cenário 1.....	62
Figura 44 – Perfil temporal para as concentrações de CRL para o Cenário 2	63
Figura 45 – Perfil temporal para as concentrações de CRL para o Cenário 3.....	64
Figura 46 - Perfil temporal para as concentrações de CRL para o Cenário 4	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Unidades operacionais da ETA - Gravatá	17
Tabela 2 – Localidades incluídas nas zonas de pressão do sistema de distribuição	18
Tabela 3 – Principais doenças de veiculação hídricas	25
Tabela 4 – Modelos de decaimento de cloro em SAAs	31
Tabela 5 – Características do SAACG	39
Tabela 6 – Características dos conjuntos motobomba da EEAT-Gravatá.....	46
Tabela 7 – Características dos trechos de adutora do sistema.....	48
Tabela 8 – Características dos testes da garrafa	50
Tabela 9 – Temperatura média para cada teste, nas Fases I e II.....	55
Tabela 10 – Resultados dos ajustes aos resultados dos ensaios da Fase I.....	57
Tabela 11 - Resultados dos ajustes aos resultados dos ensaios da Fase II	60

LISTA DE SIGLAS

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
AWWA – American Water Works Association
CAGEPA – Companhia de Água e Esgotos da Paraíba
CCO – Centro de Controle de Operações
CRL – Cloro Residual Livre
DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
DPD – N, N-dietil-p-fenilenediamina
EEAB – Estação Elevatória de Água Bruta
EEAT – Estação Elevatória de Água Tratada
ETA – Estação de Tratamento de Água
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PMSB-CG – Plano Municipal de Saneamento Básico de Campina Grande
RNF – Reservatório de Nível Fixo
RNV – Reservatório de Nível Variado
SAA – Sistema de Abastecimento de Água
SAACG – Sistema de Abastecimento de Água de Campina Grande
VCP – Válvula de Controle da Pressão
UEPB – Universidade Estadual da Paraíba

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	11
1.1.1 Objetivo geral.....	11
1.1.2 Objetivos específicos	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Sistemas de abastecimento de água (SAA).....	12
2.1.1 Sistema de abastecimento de água de Campina Grande-PB.....	14
2.1.1.1 <i>Manancial</i>	16
2.1.1.2 <i>Captação e adução de água bruta</i>	16
2.1.1.3 <i>Estação de tratamento de água – ETA</i>	16
2.1.1.4 <i>Rede de distribuição</i>	17
2.1.2 Sistema de reservação	18
2.1.3 Operação de sistemas de reservação	20
2.1.4 Qualidade da água em reservatórios	22
2.2 Qualidade da água em sistemas de abastecimento de água.....	23
2.3 O cloro na água de SAA	25
2.3.1 O cloro como desinfetante	25
2.3.2 Química do cloro na água.....	26
2.4 Decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água	28
2.4.1 Modelos da cinética de decaimento do cloro residual livre	28
2.4.2 Decaimento de cloro no seio do líquido	31
2.5 EPANET 2.0.....	32
3 METODOLOGIA	35
3.1 Caracterização da área de estudo	35
3.2 Coleta de dados operacionais e construtivos do sistema	38
3.2.1 Coleta de dados operacionais dos reservatórios	39
3.3 Coleta de dados de qualidade de água dos reservatórios	39
3.3.1 Métodos de análises	40
3.3.1.1 <i>Cloro residual livre</i>	40
3.3.1.2 <i>Temperatura</i>	41
3.4 Modelagem do sistema	41

3.4.1	Dados de entrada da rede SUMÁRIO	43
3.4.1.1	<i>Reservatório de nível fixo</i>	43
3.4.1.2	<i>Reservatório de nível variado</i>	44
3.4.1.3	<i>Válvulas</i>	45
3.4.1.4	<i>Bombas</i>	45
3.4.1.5	<i>Nós</i>	46
3.4.1.6	<i>Trechos</i>	47
3.5	Determinação das constantes cinéticas de degradação de cloro residual livre nos reservatórios	48
3.6	Simulação do comportamento do cloro residual livre	50
4	RESULTADOS.....	51
4.1	Resultados do monitoramento da concentração de CRL nos reservatórios.....	51
4.2	Decaimento do cloro nos reservatórios.....	52
4.2.1	Teste da garrafa	52
4.2.2	Modelos cinéticos de decaimento	55
4.2.2.1	<i>Fase I</i>	55
4.2.2.2	<i>Fase II</i>	58
4.3	Simulação do decaimento do cloro	61
5	DISCUSSÃO	66
6	CONCLUSÕES	70
7	RECOMENDAÇÕES.....	71
	REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

O controle da qualidade da água de consumo humano, pelo serviço de abastecimento, representa importante aspecto do processo de gestão de sistemas de abastecimento de variáveis graus de complexidade. Esse processo de gestão baseado na política de fornecimento de água de boa qualidade e em quantidade satisfatória à totalidade da população destinatária do serviço de abastecimento deve envolver planejamento e gerenciamento contínuos, o que deve implicar na contínua tarefa de tomada de decisões apoiada em fundamentação científica. Por seu turno, a vigilância, levada a efeito pela autoridade de saúde e outro importante elemento do processo de gestão da qualidade da água, deve desenvolver ações para garantir o fornecimento de água potável segura, constituindo fator de promoção da saúde da população. Em ambos os casos, a adoção de modelos de simulação da qualidade da água torna-se indispensável, particularmente em sistemas de abastecimento de média a alta complexidades.

O sistema de abastecimento de água de Campina Grande distribui água para uma população de mais de quatrocentas mil pessoas, classificado como de médio porte, é um sistema de elevada complexidade. Envolve um manancial situado a cerca de quarenta quilômetros de distância, três linhas adutoras de água tratada com aproximadamente vinte quilômetros de extensão, dois conjuntos elevatórios de água bruta, dois conjuntos elevatórios de água tratada, associados às linhas adutoras, e cerca de trinta reservatórios de distribuição. Além disso, o sistema de distribuição de água compreende cerca de 1350 km de extensão de canalizações de diversos diâmetros e materiais em diversos estágios de utilização e conservação.

O Grupo de Pesquisa Saúde Ambiental, formado por professores e alunos da Universidade Estadual da Paraíba e da Universidade Federal de Campina Grande desenvolve, há vários anos, a linha de pesquisa de Vigilância da Qualidade da Água com base na determinação, entre outros, de indicadores sentinelas e, mais recentemente, vem associando o uso do aplicativo EPANET 2.0 à simulação do comportamento desses indicadores, particularmente cloro residual livre, no sistema de abastecimento de Campina Grande. Leal (2012) simulou o comportamento do cloro residual livre no sistema de adução de água tratada e, mais recentemente,

Nascimento (2016) e Santos (2017) aplicaram a simulação desse indicador em áreas de abastecimento de bairros de Campina Grande. De fato, Nascimento (2016) propôs um modelo conceitual para a gestão da qualidade da água de consumo humano distribuída pelo sistema, com base em simulação da degradação de cloro residual livre associada a análise de risco e análises multicritério e multidecisor. Os coeficientes constantes de velocidade de degradação de cloro residual livre, utilizados nesse trabalho, foram os coeficientes de primeira ordem determinados por Leal (2012). Nascimento (2016), no entanto, sugeriu a determinação de coeficientes de decaimento de cloro residual livre específicos para trechos diversos da rede e para reservatórios de distribuição de água. Santos (2017) determinou coeficientes cinéticos para trechos da rede de distribuição constituídos por diâmetros e materiais diversos e, este trabalho é baseado na determinação de coeficientes cinéticos de degradação de cloro residual livre sob a influência de reservatórios de distribuição do sistema de abastecimento de água de Campina Grande.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Simular a degradação da qualidade da água em reservatórios do sistema integrado de abastecimento de água da cidade de Campina Grande – PB, a partir da determinação de coeficientes cinéticos de decaimento de cloro residual livre.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar coeficientes cinéticos de decaimento da concentração de cloro residual livre no volume do reservatório, com base em modelos de 1ª ordem, 1ª ordem limitada, 1ª ordem paralela e ordem n ;
- Simular a variação do cloro residual livre em reservatórios do sistema de abastecimento de água, através do simulador EPANET 2.0.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas de abastecimento de água (SAA)

Atualmente a disponibilidade de água na natureza, tem se mostrado insuficiente para atender à demanda da população em várias regiões do Planeta. Diante desse cenário, a infraestrutura dos sistemas de abastecimentos de água precisa fornecer água de forma acessível para população, com qualidade e regularidade, de modo a preservar os mananciais garantindo água para as gerações futuras, fazendo com que profissionais responsáveis por planejar, projetar, operar e gerenciar, tenham essa realidade e a capacidade de aplicá-las em suas atividades (HELLER, 2006)

Um sistema de abastecimento de água (SAA) é definido como o conjunto de instalações destinadas a produção de água potável para abastecer uma comunidade, com o dever de superar os riscos à saúde impostos pela água não potável.

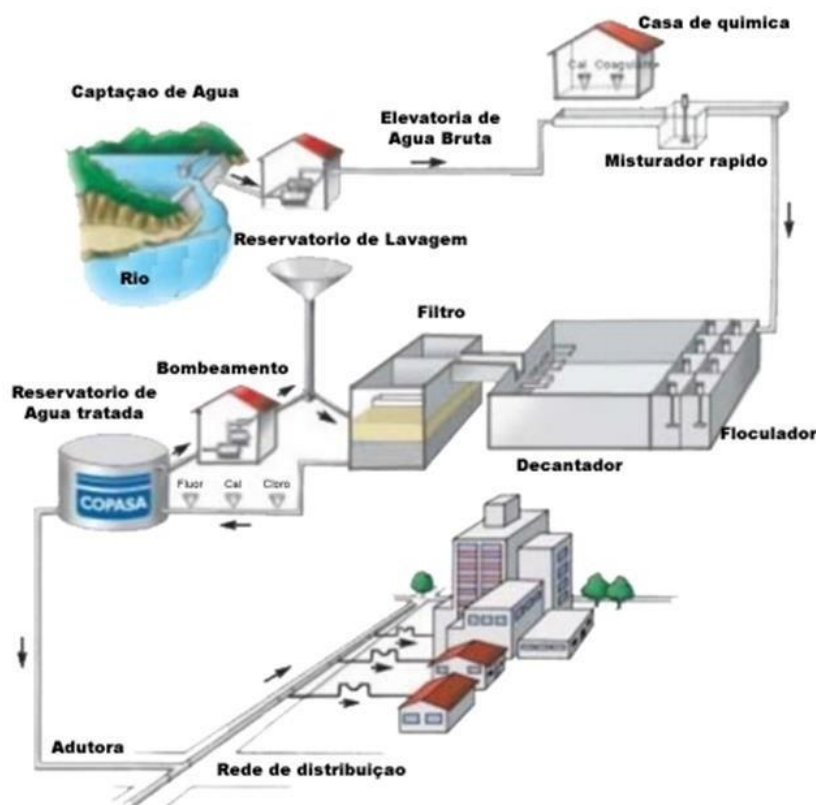
Os sistemas de abastecimento de água geralmente são constituídos pelas seguintes partes:

- ✓ Manancial – fonte de água superficial ou subterrânea, com vazão suficiente para atender o serviço de abastecimento de acordo com a demanda de projeto. A água do manancial tratada deve apresentar uma qualidade de acordo com os critérios de potabilidade estabelecidos pela Portaria 2914/11 do Ministério da Saúde.
- ✓ Captação – conjunto de equipamentos e estruturas, utilizados para a retirada de água do manancial.
- ✓ Adutora de água bruta – canalização ou canal destinado a conduzir a água captada no manancial até a estação de tratamento de água (ETA)
- ✓ Adutora de água tratada – canalização ou canal, que precede a rede de distribuição, destinado a conduzir a água.
- ✓ Estação de tratamento de água – instalação constituída de várias unidades, onde água bruta é tratada e adequada aos padrões de potabilidade para consumo humano.

- ✓ Reservatório – componente do sistema de distribuição que tem como função, regularizar as variações entre as vazões de adução e distribuição, condicionar as pressões na rede de distribuição e, quando preciso, reservar água para combate a incêndios e outras situações de emergência.
- ✓ Rede de distribuição – conjunto de condutos instalados em via pública, os quais se conectam aos ramais residenciais, com a finalidade de fornecer água potável em regime contínuo, em quantidade e pressão recomendadas. As redes de distribuição podem ser do tipo ramificada ou malhada.
- ✓ Ligação predial – é o conjunto de tubos, peças, conexões e equipamentos que interliga a rede pública à instalação predial do usuário.
- ✓ Estação elevatória – componente do sistema, composto pelo conjunto de equipamento e instalações, destinado a recalcar a água para unidade seguinte. Quando é do tipo “*booster*”, a elevatória se destina a aumentar a pressão ou a vazão da água em adutoras ou redes de distribuição.

A Figura 1 apresenta o esquema geral de um sistema de abastecimento de água.

Figura 1 – Esquema geral de um sistema de abastecimento de água



Fonte: Adaptado da Copasa (2017)

Além das unidades descritas, os SAAs apresentam vários outros acessórios e dispositivos que permitem o controle da operação dessas unidades, como válvulas de regulação, válvulas de proteção, válvulas de bloqueio, válvulas de controle de pressão, válvulas de controle de vazão, quadros de comando elétrico, medidores de vazão, tanques de alimentação unidirecional (TAU), entre diversos outros (MENESES, 2011).

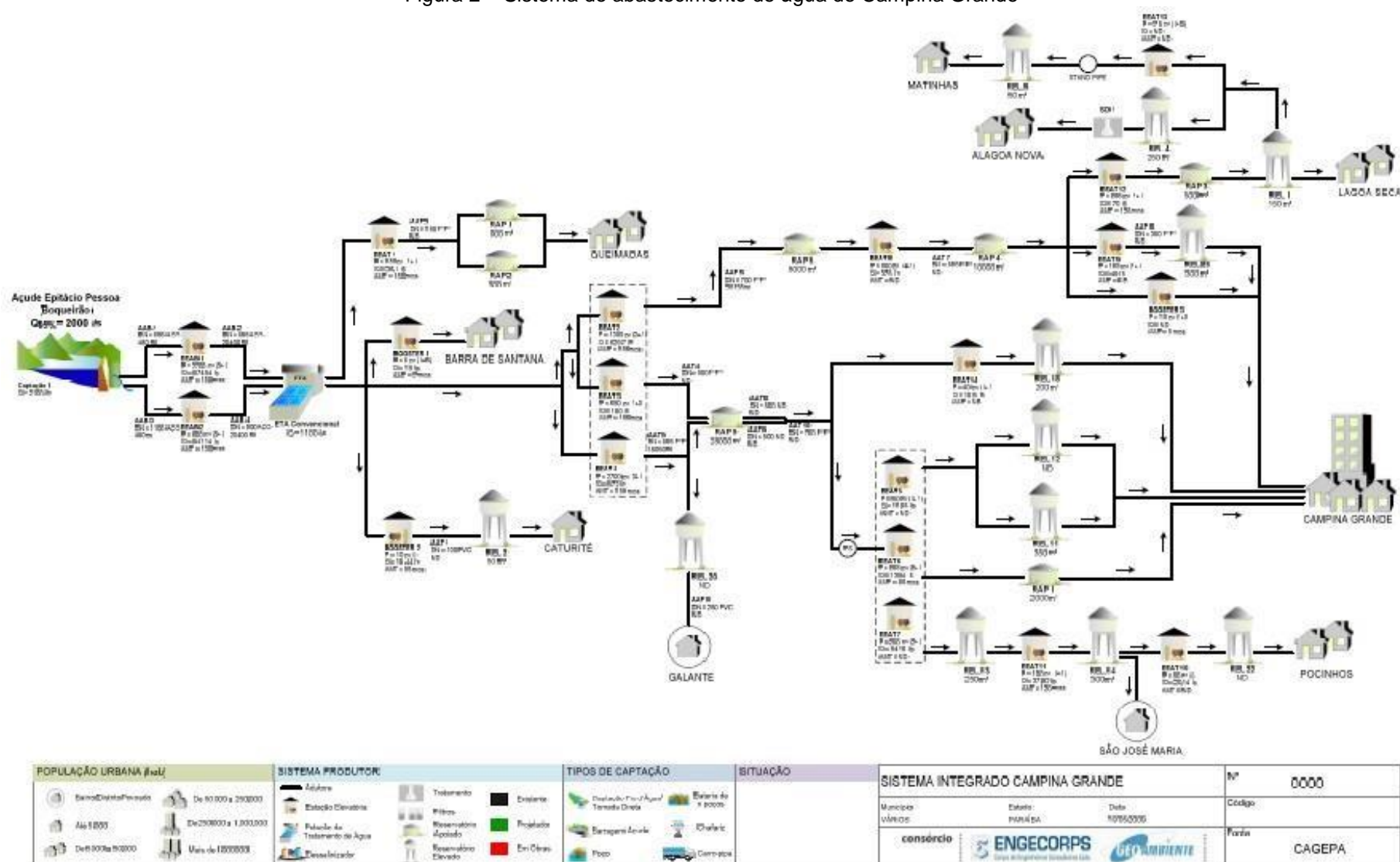
2.1.1 Sistema de abastecimento de água de Campina Grande-PB

O histórico e a configuração do sistema de abastecimento de água de Campina Grande (SAACG) já foram amplamente detalhados em outros trabalhos (ALBUQUERQUE, 2007, MENESES, 2011, NASCIMENTO, 2016, e LEAL, 2012), sendo, portanto, descritos brevemente nesta seção.

Situado na região nordeste do Brasil, Campina Grande é um município do estado da Paraíba distante 120 km de João Pessoa, capital do estado, ocupando uma área de 594,18 km² e apresentando uma população de aproximadamente 400 mil habitantes, cuja sede, a cidade de Campina Grande, caracteriza-se como o principal centro urbanístico do Agreste Paraibano (IBGE, 2010).

O SAACG é constituído por manancial, adutoras de água bruta e tratada, estações elevatórias, estação de tratamento de água (ETA), reservatórios e rede de distribuição, conforme esquematizado na Figura 2.

Figura 2 – Sistema de abastecimento de água de Campina Grande



Fonte: Nascimento (2016)

2.1.1.1 Manancial

O único manancial que abastece o SAACG é o açude Epitácio Pessoa – Boqueirão, inserido na Região Hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba, cobre uma área de 2.680 ha, apresentando uma área de drenagem de 12.400 km² e capacidade total de 411.686.287 m³ (AESAs, 2015). O manancial está localizado no município de Boqueirão, no Agreste Paraibano, e situado a 42 km de Campina Grande (NASCIMENTO, 2016).

Nos últimos cinco anos a Região do Alto Curso do Rio Paraíba vem apresentando baixos índices pluviométricos, acarretando em um longo período de seca, resultando nos baixos níveis do reservatório. Segundo dados da AESA (2017) o açude Epitácio Pessoa chegou a atingir um volume de 13.242.007 m³, representando apenas 3,2% do seu volume total.

2.1.1.2 Captação e adução de água bruta

A água bruta, captada através de torre de tomada e transportada por tubulação de aço de 1500 mm, posteriormente derivada em uma tubulação de 900 mm e outra de 1100 mm, até duas estações elevatórias de água bruta (EEAB), que a recalavam, por 22km, até a estação de tratamento de água (ETA – GRAVATÁ) (LEAL, 2012).

No cenário atual, a água bruta é captada através de um sistema flutuante, instalado para substituir a captação pela torre de tomada de fundo, quando o açude entrou no volume inativo não permitindo a operação da casa de bombas.

O sistema, projetado para uma altura manométrica de 135m.c.a., é composto por três bomba flutuantes com vazão de 1250 m³/h e motores de 200 CV, que bombeiam água para barriletes através de tubos de polietileno (PEAD), tipo de material que suporta as variações de nível do reservatório.

2.1.1.3 Estação de tratamento de água – ETA

Situada a 21 km da cidade de Campina Grande, a ETA, do tipo convencional, com capacidade para tratar 1500l/s, foi construída na localidade conhecida como

Gravatá, município de Queimadas. A Tabela 1 apresenta as características gerais das unidades que fazem parte da configuração da ETA (MENESES, 2011).

Tabela 1 – Unidades operacionais da ETA - Gravatá

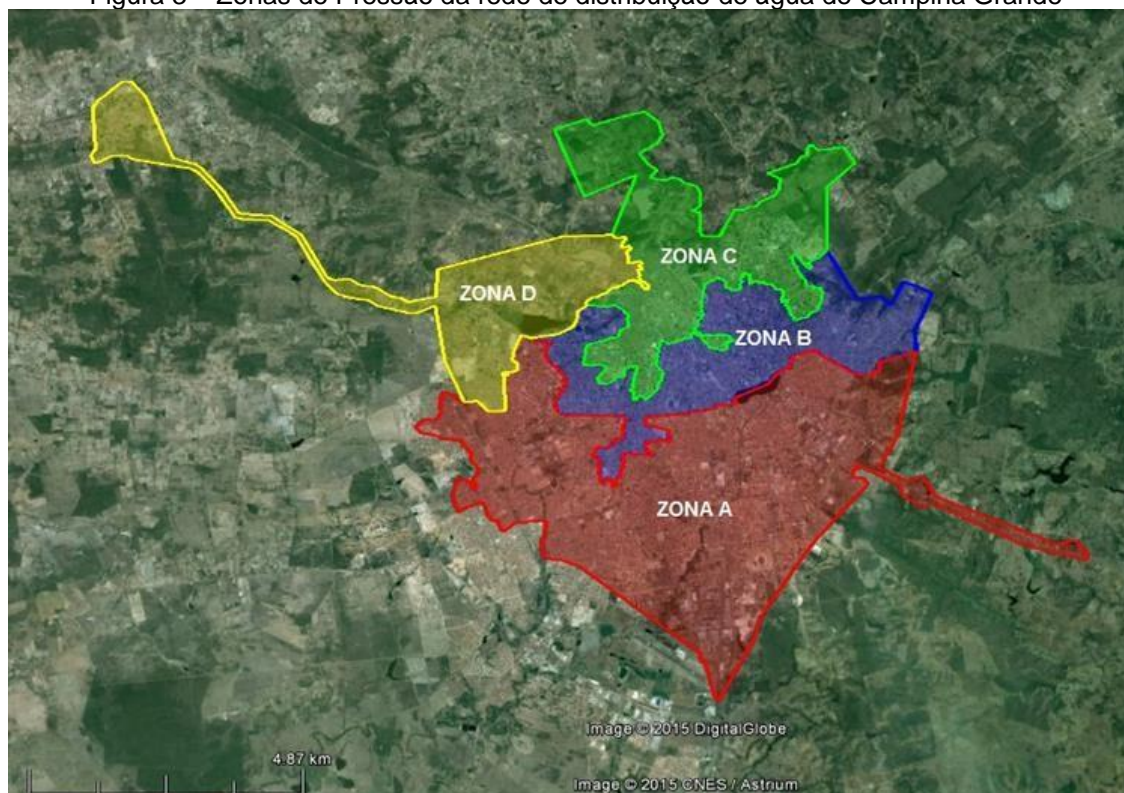
Vazão	Floculador	Decantador	Filtros	Tanque de contato
1500 l/s	Mecânico com 8 câmaras; volume total de 1.341,20 m ³	Convencional de fluxo horizontal com 6 unidades; Área total de 6.730 m ²	Dupla camada com 11 unidades; Área total de 475 m ²	Uma câmara com volume total de 4.000 m ³

Fonte: Meneses (2011).

2.1.1.4 Rede de distribuição

Segundo Nascimento (2016), a empresa ACQUAPLAN, em 1980, propôs a divisão da rede de distribuição de acordo com as bacias hidrográficas dos dois riachos, depuradora e Bodocongó, e com a topografia da área, com vistas à diminuição dos efeitos das diferenças de nível topográfico o sobre a rede de distribuição. Sendo assim, foram individualizadas quatro zonas de pressão: A, B, C e D, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Zonas de Pressão da rede de distribuição de água de Campina Grande



Fonte: Nascimento (2016).

De acordo com Meneses (2011), a rede tem um comprimento total de aproximadamente 1.350 km, sendo os trechos mais antigos, constituídos de cimento amianto e ferro fundido e os mais recentes de PVC.

A Tabela 2 apresenta as localidades que compõem as zonas de pressão do sistema de distribuição.

Tabela 2 – Localidades incluídas nas zonas de pressão do sistema de distribuição

ZONA	LOCALIDADES	NÚMERO DE ECONOMIAS
A	Quarenta, Liberdade, Cruzeiro, Santa Rosa, Jardim Paulistano, Catolé, Mirante, José Pinheiro, Malvinas, Presidente Médici e Distrito Industrial.	97.315
B	Centro, Santo Antônio, São José, Prata, Centenário, Lauritzen, Monte Castelo, Prata, Monte Santo, Castelo Branco, Nova Brasília, Jardim Tavares, Conceição, Pedregal, Conjunto dos Professores.	33.628
C	Alto Branco, Juracy Palhano, Nações, Cuités, Palmeira, o distrito de Jenipapo e cidades de Lagoa Seca, Alagoa Nova, São Sebastião de Lagoa de Roça e Matinhas.	29.996
D	Jeremias, Bodocongó, São Januário, Severino Cabral, Lagoa de Dentro, São José da Mata, zona rural de São José da Mata e a cidade de Pocinhos.	20.514
TOTAL		181.453

Fonte: Nascimento (2016).

2.1.2 Sistema de reservação

Geralmente as unidades de reservação são concebidas e operadas focando como principais objetivos a regularização entre as vazões de adução e de distribuição, o condicionamento das pressões na rede de distribuição e, quando necessário, a reserva para combate a incêndios e outras situações emergenciais (COELHO e LIBÂNIO, 2006).

Na grande maioria dos sistemas de abastecimento, a adução de água tratada se dá por meio de instalações elevatórias. Nas unidades de reservação ocorrem menores variações na vazão de recalque, logo são desenvolvidas estratégias passíveis de reduzir o consumo de energia elétrica, interrompendo a adução nos períodos do dia de maior tarifa elétrica (COELHO e LIBÂNIO, 2006).

De acordo com Tsutiya (2006), os reservatórios de distribuição são classificados quanto à posição no sistema e no terreno, quanto à forma e aos materiais de construção. Conforme a posição no sistema, os reservatórios podem

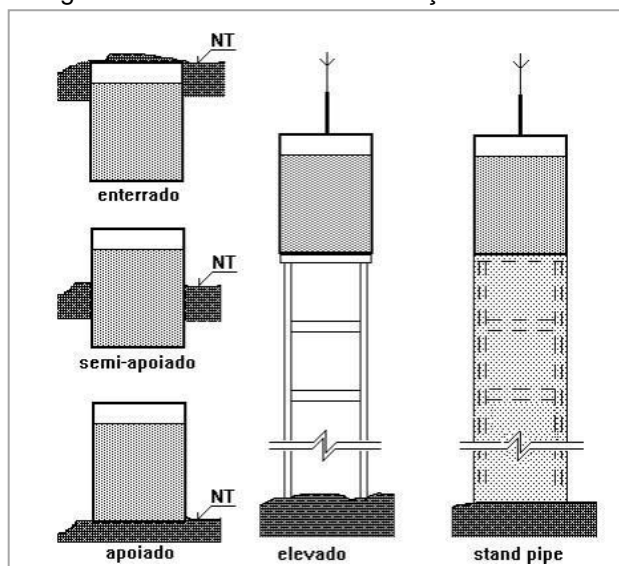
ser de montante, jusante e de posição intermediária, de modo a atender os limites de pressão máxima de 50 m.c.a. e mínima de 10 m.c.a.

Segundo Guimarães et al. (2007), quanto à localização no terreno, os reservatórios são classificados em:

- Enterrado - quando se situa completamente abaixo da cota do terreno;
- Semi-enterrado ou semi-apoiado - quando pelo menos um terço da sua altura está abaixo do nível do terreno;
- Apoiado - a laje de fundo do reservatório está a uma profundidade menor do que um terço de sua altura total;
- Elevado - quando a cota de fundo do reservatório é superior à cota do terreno onde se localiza;
- Stand pipe - quando apresenta estrutura de elevação embutida de maneira a manter contínua o perímetro da secção transversal da edificação.

As formas de reservatórios estão ilustradas na Figura 4. (GUIMARÃES et al., 2007).

Figura 4 – Reservatórios em relação ao terreno



Fonte: Adaptado de Guimarães et al. (2007).

A forma do reservatório deve buscar a máxima economia global em fundação, estrutura, utilização de área disponível, equipamentos de operação e interligação das unidades. Para os reservatórios enterrados, semi-enterrados e apoiados,

existem diversos tipos de formatos, mas, normalmente, a predominância é das formas circular e retangular. Contudo, de modo geral, não existe restrição quanto à forma dos reservatórios (TSUTIYA, 2006).

No que diz respeito ao material de construção dos reservatórios, esses podem ser construídos de diversos materiais, no entanto, os mais comuns são o concreto armado e o aço.

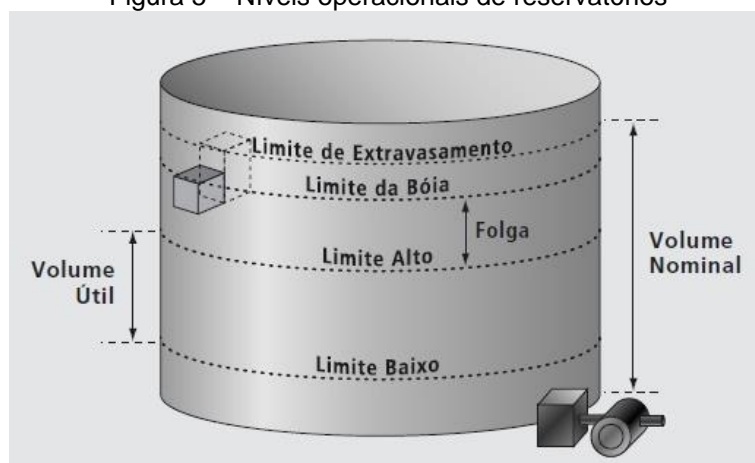
2.1.3 Operação de sistemas de reservação

Na maioria dos casos, a operação de reservatórios em SAA resume-se no fechamento ou abertura de válvulas de controle e partida ou desligamento de bombas variando as vazões aduzidas, para manter o abastecimento normal. As decisões operacionais do centro de controle operacional (CCO) são feitas com base nas medidas de estado do sistema (nível, pressão junto às válvulas, etc.) em tempo real (TSUTIYA, 2006).

Com o intuito de aprimorar a distribuição de água, obter a capacidade máxima de reservação e dar segurança operacional ao sistema, é necessário estabelecer limites operacionais de segurança e regras operacionais para os reservatórios de distribuição. Logo, serão indicadas as condições que são consideradas ideais para a operação, cuja variabilidade ocorre tanto na sua amplitude quanto na posição dentro da dimensão do reservatório ao longo do ciclo operacional, observando-se o comportamento da demanda de abastecimento (MENESES, 2011).

Os principais parâmetros operacionais dos reservatórios estão apresentados na ilustração da Figura 5 e descritos a seguir:

Figura 5 – Níveis operacionais de reservatórios



Fonte: Ohara et al. (2002).

- Limite de extravasamento (L.E.): consiste na lâmina d'água, na qual começa a haver perda d'água pelo sistema de extravasamento.
- Limite da boia (L.B.): nível de água onde é acionado o mecanismo de uma boia que atua localmente no fechamento da válvula de controle do reservatório, independentemente da atuação do controlador do CCO. A boia é considerada um recurso de segurança extrema.
- Limite Alto (L.A.): caracteriza-se por ser o nível d'água, onde é emitido um alarme visual nos monitores dos controladores, para que eles possam agir no fechamento da válvula de controle ou desligamento de bomba em tempo hábil para que não haja extravasamento ou atuação da boia de segurança.
- Folga (Δh): é a altura correspondente à diferença entre o L. B. e o L.A., compreendendo o acréscimo de volume entre a emissão do alarme de L.A. e o total fechamento da válvula de controle.

O limite alto assume papel fundamental na operação. Ele representa o nível máximo do reservatório para que haja tempo hábil de manobra, evitando que a água atinja o extravasor ou que a boia de segurança seja acionada.

$$\Delta h = Vel \times T_{total} \quad (1)$$

Sendo,

$$T_{total} = T_{rec} + T_{fech} * P(\%) \quad (2)$$

Onde,

Δh : Folga de segurança;

Vel: Velocidade de subida da lâmina d'água;

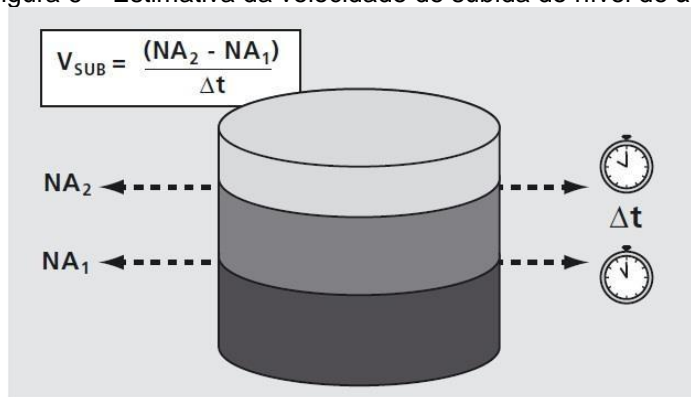
T_{total} : Tempo de reconhecimento do alarme (T_{rec}) somado ao tempo de fechamento da válvula de controle (proporcional à sua abertura);

T_{fech} : Tempo total de fechamento da válvula de controle;

P (%): Posição da válvula de controle.

As velocidades de subida do nível d'água são obtidas dos registros da operação, estimadas em função da variação do nível d'água e o intervalo de tempo em que se deu esta variação, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Estimativa da velocidade de subida do nível de água



Fonte: Ohara et al. (2002).

Onde,

V_{sub} : Velocidade de subida da lâmina de água;

Δt : Intervalo de tempo.

2.1.4 Qualidade da água em reservatórios

A qualidade da água nos reservatórios é questão pouco abordada, resumindo-se, nessas unidades, a manutenção da concentração de cloro residual. No entanto, já foram registrados vários surtos de doenças de transmissão hídrica, relacionados a problemas na reservação, principalmente pela deterioração da qualidade da água tratada (COELHO e LIBÂNIO, 2006).

Na elaboração do projeto de sistema de reservação, devem ser consideradas várias variáveis, com a finalidade de manter a qualidade da água. Uma alta razão volume do reservatório/vazão aduzida resultará em maiores tempos de detenção que, ao lado de configuração indevida dos dispositivos de entrada e saída de água no reservatório, poderá acarretar na estratificação de águas de diferentes idades, afetando negativamente suas características (ibid.).

O crescimento e a aclimação das bactérias nitrificantes a condições de pH e à presença do residual do desinfetante, favorecendo a nitrificação, estão diretamente ligados a longos tempos de detenção. Nas águas cloradas, esse fenômeno significa uma queda nas concentrações do cloro residual livre, uma vez que o cloro é utilizado na oxidação do nitrogênio amoniacal (amônia) para a formação de cloraminas ou cloro residual combinado (CRC) (ibid.).

A qualidade da água também pode sofrer alterações devido ao contato da água armazenada com o concreto das paredes do reservatório; isso ocorre devido às distintas concentrações de carbonato de cálcio na água e na superfície de contato das unidades de reservação, observando-se uma deterioração do concreto. Tal processo ocorre mais acentuadamente no caso de águas brandas, por apresentarem menores concentrações de sais de cálcio, configurando-se em um meio mais ávido pelo sal (ibid.).

2.2 Qualidade da água em sistemas de abastecimento de água

Em paralelo com o crescimento populacional, cresce também a preocupação das companhias de saneamento com relação à qualidade da água no SAA. Segundo Pierezan (2009), um dos principais problemas é a variação da qualidade água nos SAAs e a influência desses sistemas na qualidade da água tratada.

De acordo com Beleza (2005), um dos principais fatores que afetam a qualidade da água é o controle pouco eficiente do processo de produção na ETA. Na fase de tratamento da água, podem ocorrer problemas que provoquem uma ineficiência na coagulação/floculação, oriundos do uso inadequado do coagulante, e/ou no erro de projeto do tempo de mistura rápida e dos gradientes de velocidade nos floculadores. As limpezas deficientes dos filtros, podem causar o arraste de

partículas que, por sua vez, provocam o aumento da turbidez da água, acarretando uma desinfecção menos eficaz.

Além do processo de desinfecção, a Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011) exige a presença do residual de cloro livre com concentração mínima de 0,20 mg/L, ao longo de todo o sistema de distribuição, a fim de garantir a qualidade microbiológica da água.

O percurso da água tratada no sistema de distribuição provoca diversas mudanças na qualidade, até chegar ao consumidor final. Vasconcelos et al. (1996) citam que o movimento ou ausência do movimento da água em SAAs podem ter efeito grave na qualidade da água tratada. Segundo Hart et al. (1992), os fatores que influenciam a qualidade da água, durante o seu percurso no sistema de distribuição, são: as características físicas, químicas e biológicas da água; as propriedades dos condutos (idade, tipo, rugosidade, formação de depósitos, etc.); as especificidades do sistema (curvas, saídas de água, reduções, etc.); características de funcionamento do sistema (consumo, velocidade da água, perdas, tempos de residência, etc.) e a mistura da água de diferentes origens.

Clark et al. (1993), afirmam que esses processos influenciam a qualidade da água tratada e, frequentemente, são responsáveis por surtos de doenças de veiculação hídrica. Na Tabela 3 são apresentadas as principais doenças de veiculação hídrica e os respectivos agentes etiológicos, sintomas e fontes de contaminação.

Outros relatos de contaminação ocorrem por meio da permeação, que é definida como a passagem de contaminantes externos por meio dos poros da tubulação para a água. Solventes orgânicos são os tipos mais comuns de contaminantes em tubulações plásticas (PVC) (PIEREZAN, 2009). As deficiências no sistema de reservação de água representam outro ponto de entrada de contaminantes. Ventosas sem proteção, pontos de acesso que não são fechados, rachaduras/aberturas na cobertura do reservatório, podem resultar em pontos de entrada de contaminantes. O revestimento do interior do reservatório pode resultar em contaminação, caso se desprenda ou não tenha sido corretamente curado (USEPA, 2006).

Tabela 3 – Principais doenças de veiculação hídricas

Doença	Agente etiológico	Sintomas	Fonte de contaminação
Febre tifóide e paratifóide	<i>Salmonella typhi</i>	Febre elevada, diarreia	Fezes humanas
Disenteria bacilar	<i>Salmonella paratyphi</i> A e B	Diarreia	Fezes humanas
Disenteria amebiana	<i>Shigella dysenteriae</i>		
	<i>Entamoeba histolytica</i>	Diarreia, abscesso do fígado e intestino delgado	Fezes humanas
Cólera	<i>Vibrio cholerae</i>	Diarreia e desidratação	Fezes humanas e águas costeiras
Giardíase	<i>Giardia lamblia</i>	Diarreia, náusea, indigestão, flatulência	Fezes humanas e de animais
Hepatite A e B	Vírus da hepatite A e B	Febre, icterícia	Fezes humanas
Poliomielite	Vírus da poliomielite	Paralisia	Fezes humanas
Criptosporidiose	<i>Cryptosporidium parvum</i> , <i>Cryptosporidium muris</i>	Diarreia, anorexia, dor intestinal, náusea, indigestão, flatulência	Fezes humanas e de animais
Gastroenterite	<i>Escherichia coli</i> , <i>Campylobacter jejuni</i> , <i>Yersinia enterocolitica</i> , <i>Aeromonas hydrophyla</i> , Rotavírus e outros vírus entéricos	Diarreia	Fezes humanas

Fonte: Adaptado de Salgado (2008).

2.3 O cloro na água de SAA

2.3.1 O cloro como desinfetante

Há tempos, desde os finais do Século XIX, é conhecida a capacidade da água em propagar doenças. As doenças causadas por protozoários, vírus e bactérias são tidas como causadoras de epidemias e forte ameaça para a saúde humana. Com isso, a população chegou à conclusão da necessidade da inativação desses microrganismos na água, deixando-a segura para a saúde da população. Sendo assim, surge o conceito de desinfecção para água destinada ao consumo humano (FIGUEIREDO, 2014). O cloro, em sua forma gasosa, e seus derivados, como hipoclorito de cálcio ou hipoclorito de sódio, é o agente químico mais utilizado para desinfecção em várias estações de tratamento de água do mundo, devido à sua eficácia, simplicidade de aplicação e custo reduzido (DANIEL, 2001).

O teor do residual de cloro ou cloro residual livre é um dos principais indicadores da qualidade da água em SAA, sendo essa capacidade residual uma característica peculiar do cloro, pois a presença de uma certa concentração de desinfetante no trajeto entre a estação de tratamento e a residência do consumidor, confere à água um grau maior de proteção. Segundo Hass (1999), a diminuição ou

ausência do residual de um desinfetante na água, pode desencadear um processo de contaminação na água do sistema de distribuição. Isso ocorre devido à proliferação de microrganismos que não foram inativados no tratamento a montante, e, também, pelo crescimento de biofilmes nas tubulações.

O maior problema do uso do cloro como desinfetante, é a formação de subprodutos da desinfecção (SPD), gerados das reações químicas entre o cloro e matéria orgânica natural (ácidos húmicos e fúlvicos) presente na água e que não foi removida na ETA. De acordo com Figueiredo (2014), dentre os vários tipos de SPD encontrados, os mais comuns e de maiores concentrações na água são os trihalometanos (THM) e os ácidos haloacéticos (HAA). Clark et al. (1995) e WHO (2004), afirmam que a presença dos THMs na água de abastecimento, significam um risco a saúde humana, devido ao seu potencial cancerígeno. Alguns estudos apontaram a correlação entre tipos de câncer e a ingestão de THMs (TOMINAGA e MIDIO, 1999).

2.3.2 Química do cloro na água

O cloro pode ser adicionado à água na forma gasosa, sendo dissolvido no ponto de aplicação, e na forma sólida como hipoclorito de cálcio ou solução de hipoclorito de sódio. Quando o cloro é adicionado a uma água quimicamente pura ocorre a seguinte reação (CLARK E SIVAGANESAN, 2002).



Essa reação ocorre rapidamente e, em solução diluída e pH acima de 4, o equilíbrio da reação se desloca para a direita, sobrando pouco Cl_2 em solução (MEYER, 1994). O ácido hipocloroso ($HOCl$), ioniza-se em meio aquoso originando o íon hipoclorito (OCl^-) e formando o equilíbrio representado pela Equação 4 (DEBORDE e VON GUNTEN, 2008).



Em um pH 6 uma solução de cloro contém 95% de $HOCl$, por outro lado, em um pH 9 ela contém 95% de OCl^- (CLARK e SIVAGANESAN, 2002).

Na Figura 7 estão representadas as quantidades relativas de HOCl e OCl em função do pH. A ação desinfetante e oxidante conhecida do cloro vem do ácido hipocloroso, composto que persiste na água, sendo caracterizado como um ácido fraco. O cloro encontrado na água na forma destes dois compostos, é conhecido como cloro residual livre (ROSSIN, 1987). Outra forma de aplicar o cloro, é através dos compostos hipoclorito de cálcio (Ca(OCl)_2) e hipoclorito de sódio (NaOCl), que em contato com a água se ionizam conforme as reações:

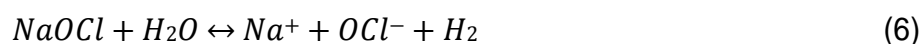
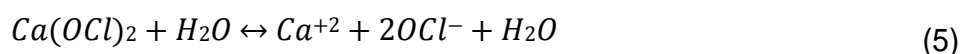
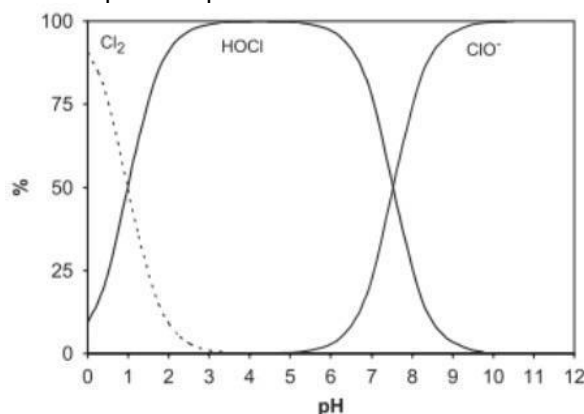
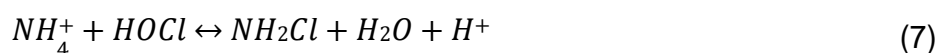


Figura 7 – Efeito do pH nas quantidades relativas de HOCl e OCl- a 25°C



Fonte: Figueiredo (2014)

Quando na água existem certos constituintes, o cloro presente tende a reagir formando compostos de menor poder desinfetante, isso ocorre principalmente quando existem amônia e composto de nitrogênio amino (PIEREZAN, 2009). Esses compostos formados na presença de íon amônio são chamados de cloraminas, e o cloro presente sob essa forma é denominado de cloro residual combinado (ROSSIN, 1987). As reações representadas pelas Equações 7, 8 e 9 apresentam as formações de monoclорamina, dicloramina e tricloramina, respectivamente.





2.4 Decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água

A dissolução do cloro em água resulta em espécies químicas que participam em várias reações com compostos de naturezas orgânica e inorgânica. Essas reações são geralmente agrupadas em duas componentes, relativas ao decaimento no seio do líquido e ao decaimento que ocorre pelo contato com a parede do recipiente, denominado decaimento de parede (VIEIRA et al., 2004). O decaimento do cloro residual na água tende a aumentar à medida que esta percorre a rede de distribuição, sendo o residual de cloro menor em uma ponta de rede, do que na saída da ETA (POWELL et al., 2000).

De acordo com Fisher et al. (2011), o decaimento do cloro pode trazer duas consequências indesejáveis; primeiramente, uma alta dosagem aplicada na entrada do sistema de distribuição, a fim de atender ao valor exigido de cloro residual livre nas extremidades da rede, o que, consequentemente irá gerar reclamações de sabor e odor pelos consumidores, sendo necessário estabelecer pontos de recloração no sistema para que a dose inicial seja menor, em segundo lugar, a formação de subprodutos que são prejudiciais à saúde humana.

O comportamento da concentração de cloro durante o tempo de reação apresenta duas fases distintas. A primeira é uma fase de decaimento muito rápido, que ocorre na aplicação de uma concentração de cloro mais elevada na ETA e que demora poucos minutos. A segunda fase caracteriza-se por um decaimento lento e ocorre ao longo do sistema de distribuição. Apesar de ser comum existir decaimento mensurável numa rede, um decréscimo abrupto ou maior do que o usualmente verificado em determinada zona pode ser indicativo da entrada de contaminantes no sistema (FIGUEIREDO, 2014).

2.4.1 Modelos da cinética de decaimento do cloro residual livre

Nas duas últimas décadas, vários estudos foram realizados em diversos países sobre o decaimento do cloro na água potável, e vários modelos foram propostos para descrever a cinética de decaimento desse desinfetante. Mas o

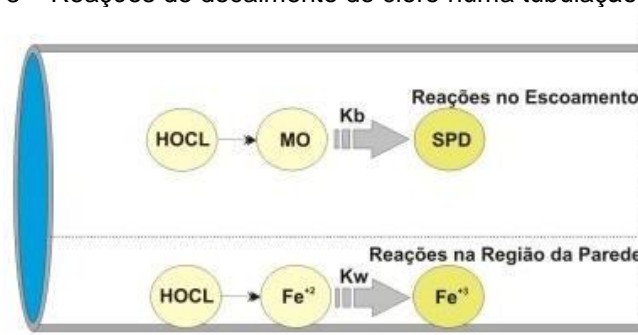
conhecimento a respeito da cinética química das reações que envolvem o cloro ainda é limitado em SAAs, sendo a modelagem baseada na consideração da seguinte reação global:



Onde Cl representa as espécies de cloro e os reagentes representam todas as espécies que podem potencialmente reagir com o cloro. Essa reação envolve as diversas reações com as quais o cloro pode participar em meio aquoso, cada uma caracterizada por mecanismos e cinéticas individuais. Devido à composição exata dos reagentes permanecer desconhecida, e isto ser muito complexo, os modelos desenvolvidos têm adotado uma abordagem “caixa preta”, na qual as reações de decaimento do cloro não são consideradas separadamente, mas como um todo, apresentando uma velocidade global e uma lei de cinética global para representar o decaimento do cloro. (VIEIRA et al., 2004).

De acordo com Vieira et al. (2001) o cloro residual livre reage facilmente com espécies inorgânicas e orgânicas presentes, tanto na água transportada como na interface com os elementos físicos do sistema. A combinação das reações que ocorrem no escoamento e junto às paredes das tubulações, resulta na perda do desinfetante residual, sendo representadas pelas constantes cinéticas K_b (K_{bulk}) e K_w (K_{wall}) (CLARK et al., 1993; VIEIRA e COELHO, 2003). A Figura 8 ilustra o exemplo do decaimento do cloro devido às reações no escoamento com matéria orgânica (MO) gerando subprodutos da desinfecção (SPD) e na região da parede da tubulação.

Figura 8 – Reações de decaimento do cloro numa tubulação de ferro



Fonte: Adaptado de Rossman (2000)

Comumente os modelos de transporte de cloro são baseados nas leis de conservação da massa e geralmente são descritos por uma equação de advecção,

que tem como simplificação, assumir dimensão única, podendo ser expressa na forma.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + r(C_i) \quad (11)$$

Sendo, C_i a concentração (massa/volume) na tubulação i em função da distância x e do tempo t , u_i a velocidade média do escoamento (comprimento/tempo) na tubulação i e r a taxa de reação (massa/volume/tempo), função da concentração, que representa a combinação dos efeitos das reações no escoamento e na região da parede da tubulação (MORAES, 2008).

A maioria dos modelos de qualidade existentes assume uma cinética de primeira ordem para reproduzir o decaimento do cloro em SAA, sendo definido o residual de cloro conforme a seguinte equação:

$$C = C_0 e^{-tk} \quad (12)$$

Onde C é a concentração de cloro no tempo t ; C_0 é concentração de cloro inicial e k é a constante de decaimento de primeira ordem.

Os modelos dinâmicos usados para simular a distribuição da substância química nos sistemas de distribuição podem ser baseados nos métodos de Euler ou nos de Lagrange. Os modelos Lagrangeanos podem ser divididos em: método dirigido pelo tempo (TDM) e método dirigido pelo evento (EDM). Já os modelos Eulerianos podem ser divididos em: método das diferenças finitas (FDM) e método do volume discreto (DVM) (SALGADO, 2008).

Rossman & Boulos (1996), levando em consideração resultados obtidos para os testes realizados com o *software* EPANET 1.0 (1994), chegaram à conclusão que o método Lagrangeano dirigido pelo tempo (TDM) é o mais variável e o que melhor reflete o comportamento da qualidade da água, quando comparado com os outros modelos.

2.4.2 Decaimento de cloro no seio do líquido

A qualidade da água e suas características físicoquímicas conduzem as reações que ocorrem na massa líquida, tornando-se difícil a determinação de um K_b padrão para qualquer tipo de SAA. Boccelli (2003) e Vieira (2004), apresentam propostas para se estimar o K_b , no entanto, este parâmetro está muito ligado com a natureza da água, tornando difícil dizer qual das proposições é melhor, com isso não se pode dizer qual será o comportamento da curva de decaimento de cloro livre real. Devido à sua simplicidade, os modelos de primeira ordem são os mais utilizados, contudo, na maioria das vezes, não conseguem descrever com a exatidão necessária o decaimento do cloro nos sistemas de distribuição (CLARK e SIVAGANESAN, 2002), com isso é adequado testar o ajuste de outros modelos de decaimento.

Haas e Karra (1984) investigaram alguns modelos para descrever o decaimento do cloro, os quais são representados na Tabela 4.

Tabela 4 – Modelos de decaimento de cloro em SAAs

Modelo	Equação integrada	
Primeira ordem	$C = C_0 \times \exp(-kt)$	(13)
Enésima ordem	$C = [kt(n-1) + (\frac{1}{C_0})^{(n-1)}]^{-\frac{1}{n-1}}$	(14)
Primeira ordem limitada	$C = C^* + (C_0 - C^*)e^{-kt}$	(15)
Primeira ordem paralela	$C = C_0xe^{(-k_1t)} + C_0(1-x)e^{(-k_2t)}$	(16)

Fonte: Haas & Karra (1984).

Onde: k é a constante de velocidade, n é a ordem da reação do modelo de enésima ordem, C^* é a concentração limite de cloro (mg/L), x é adimensional. O modelo de enésima ordem estabelece que a constante específica de velocidade é proporcional à enésima potência da concentração. O modelo de primeira ordem limitada assume que uma parte (C^*) da concentração inicial (C_0) de cloro não reage e que somente a outra parte ($C_0 - C^*$) decai exponencialmente segundo uma ordem de reação igual a um. O modelo de primeira ordem paralela assume que existam duas constantes específicas de velocidade: uma parte (xC_0) da concentração inicial de cloro decai exponencialmente com uma constante específica de velocidade igual a

k_1 , e a outra $(1 - x)C_0$ decai exponencialmente com uma constante específica de velocidade igual a k_2 .

De acordo com Vieira et al. (2004), o modelo de primeira ordem paralela foi o que apresentou o melhor ajuste ao real comportamento do consumo de cloro livre na massa líquida, por apresentar duas fases da degradação do cloro, sendo a inicial a fase mais rápida, na qual ocorrem rápidas reações do cloro com organismos presentes na água, e a segunda fase mais lenta, na qual estão presentes menos matérias para reagir com o desinfetante, o que difere do modelo de primeira ordem que é bastante empregado nas modelações da qualidade da água.

Munavalli e Kumar, (2003), admitem que o decaimento do cloro na massa de água está, de certa forma, definido e pode ser cabível admitir reações de primeira ordem nos modelos de qualidade.

O desempenho dos modelos que representam o decaimento do cloro depende dos valores dos seus respectivos parâmetros, para a representação do decaimento de cloro na rede, sendo necessário considerar alguns pontos como a representatividade, a complexidade para determinação de parâmetros, a flexibilidade e a praticidade do modelo adotado (SALGADO, 2008).

A literatura aponta a necessidade de incorporar nos modelos os fatores que influenciam o decaimento do cloro, como a temperatura e a concentração inicial de cloro, a concentração de matéria orgânica natural, e as condições hidráulicas do escoamento, de maneira a deixá-los mais robustos (FIGUEIREDO, 2014).

Os diferentes parâmetros dos vários modelos são estimados através da aplicação dos modelos a ensaios experimentais de laboratório, denominados genericamente por testes da garrafa (*bottle tests*) (POWELL et al., 2000).

2.5 EPANET 2.0

O *National Risk Management Research Laboratory*, é um laboratório da USEPA (United States Environmental Protection Agency) responsável por desenvolver informações científicas e de engenharia necessárias à EPA (Environmental Protection Agency), para apoio à decisão no âmbito de regulamentos e de políticas. O EPANET é um programa computacional desenvolvido por esse

laboratório para proceder simulações estáticas ou dinâmicas o qual se tornou o programa de modelagem hidráulica e de qualidade de água mais empregado no mundo, devido à sua facilidade de uso e por ser um programa disponibilizado gratuitamente (NASCIMENTO, 2016).

Um sistema de distribuição de água é representado no EPANET por bombas, válvulas, tubulações, nós, reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável. Na componente hidráulica, é permitida a criação de uma rede completamente caracterizada (incluindo todos os condutos sem simplificações), executando simulações hidráulicas que são um pré-requisito para um modelo robusto de qualidade de água. Na componente de qualidade de água, o EPANET permite modelar a distribuição espacial e temporal das variáveis de qualidade, nomeadamente a idade da água, a porção de água proveniente de diferentes fontes, a concentração de um constituinte não-reativo (com um traçador) ou de um constituinte reativo, que pode sofrer decaimento (cloro residual) ou crescimento (um subproduto da desinfecção - SPD) (FIGUEIREDO, 2008).

Os gestores de SAA enxergaram a funcionalidade da modelagem da qualidade como uma ferramenta eficaz que permite estudar e compreender os movimentos e transformações que a água sofre ao longo dos sistemas de distribuição, como, por exemplo, o decaimento do cloro residual livre, a definição dos pontos de cloração no sistema e a dosagem, o crescimento de SPD, o rastreamento da propagação de contaminantes e a localização e dimensão dos reservatórios juntamente com o controle da idade da água no sistema (ROSSMAN, 2008).

Quando se trata de qualidade, o EPANET leva em consideração um transporte por advecção em tubos, onde uma substância dissolvida é conduzida ao longo do tubo à mesma velocidade de escoamento, sujeita a uma taxa de reação r . Este, admite ainda que a dispersão longitudinal é um processo negligenciável para as condições operacionais mais frequentes nos SAA (regimes turbulentos) (ROSSMAN, 2000).

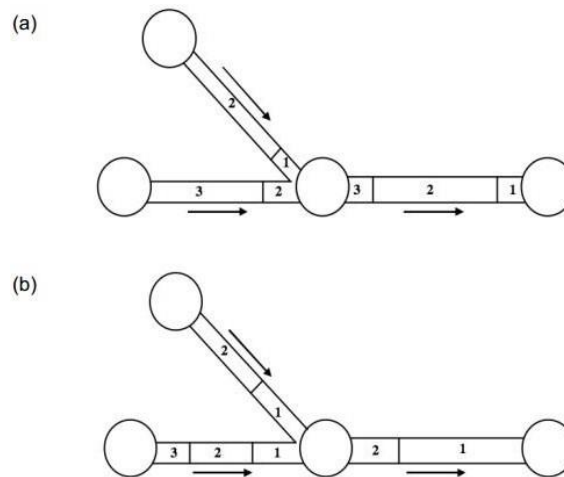
De acordo com Rossman (2000), nos reservatórios, assume-se mistura completa. Nos reservatórios de nível variável a concentração dos constituintes resulta da mistura do conteúdo do reservatório, da vazão que entra e das reações que possam ocorrer no seu interior. Este processo é representado por:

$$\frac{\partial(V_s C_s)}{\partial t} = \sum_{i=1}^{I_s} Q_i C_{i|x=L_i} - \sum_{j=1}^{O_s} Q_j C_{j|x=L_j} + r(C_s) \quad (17)$$

onde, V_s é o volume armazenado no instante t , C_s é a concentração do constituinte dentro do reservatório, I_s é o conjunto de tubos que fornecem vazão para a estrutura de armazenamento, Q_i é a vazão na tubulação i , Q_j é a vazão na tubulação j , O_s é o conjunto de tubos que recebem vazão da estrutura de armazenamento, $C_{i|x=L_i}$ é a concentração no final da tubulação i e $C_{j|x=L_j}$ é a concentração no final da tubulação j e r é a taxa de reação.

O EPANET faz uso do método Lagrangeano *time-driven* que se caracteriza por seguir o movimento da água ao longo dos tubos entre etapas de cálculos fixos. A dimensão do segmento mais a montante do tubo aumenta com a entrada de água, e a dimensão do segmento mais a jusante diminui de igual valor à medida que a água deixa o tubo. A dimensão dos segmentos intermediários mantém-se inalterada, conforme representado esquematicamente na Figura 9 (FIGUEIREDO, 2008).

Figura 9 – Comportamento dos segmentos utilizando o método Lagrangeano time-driven, tempo t (a) e tempo $t + \Delta t$ (b)



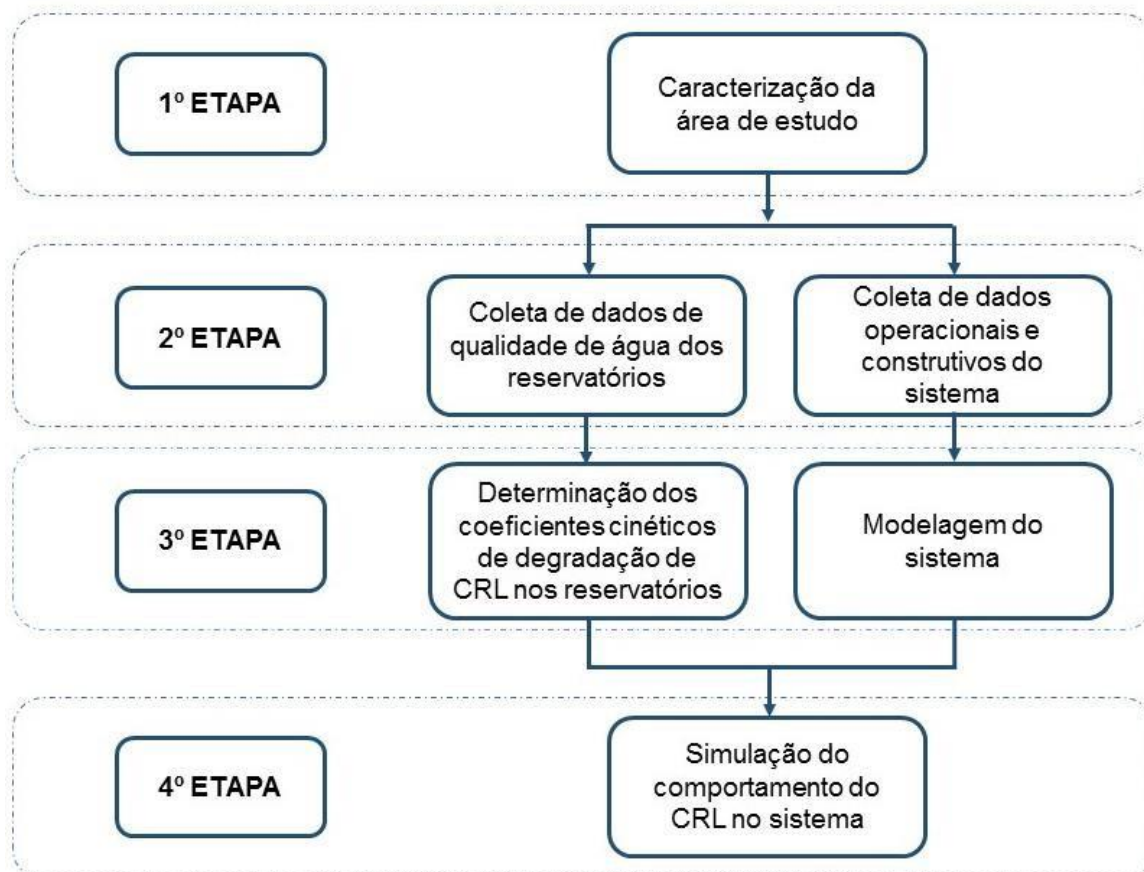
Fonte: adaptado de Figueiredo (2008).

Em cada etapa de cálculo, a qualidade da água de cada segmento representa as reações que ocorrem entre intervalos de cálculos. Logo após, é determinada a concentração em cada nó, correspondente aos segmentos derivados de cada tubo, sendo o volume correspondente à vazão do escoamento do tubo a multiplicar pela etapa de cálculo. A qualidade nos reservatórios de nível variável é atualizada de acordo com a Equação 17 (ROSSMAN, 2000).

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas quatro etapas metodológicas conforme apresentadas no fluxograma da Figura 10.

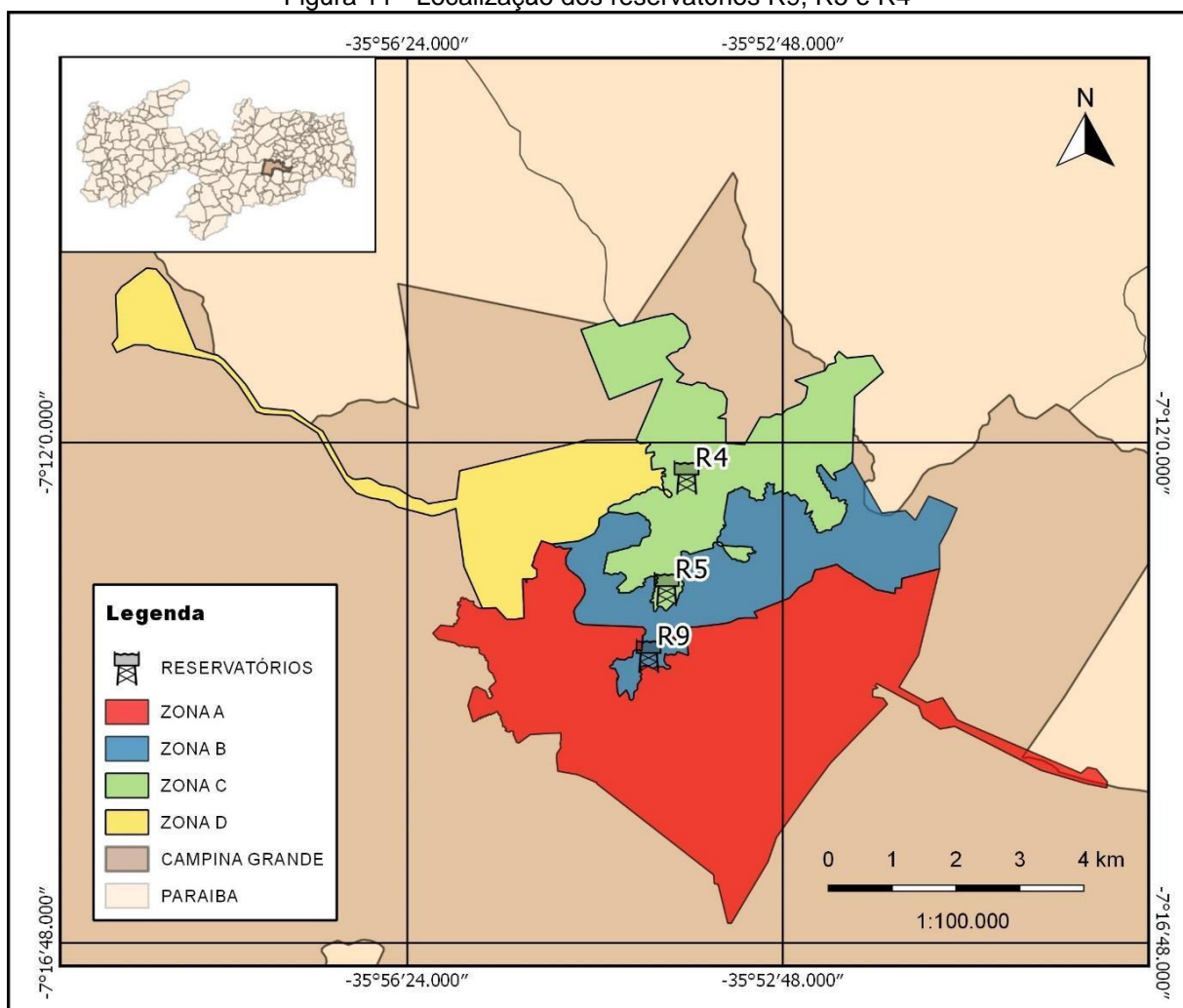
Figura 10 – Etapas metodológicas da pesquisa



3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada no sistema de abastecimento de água, nas Zonas de Pressão A, B, C e D, nos reservatórios R9, R5, R4 (Figura 11) respectivamente, do município de Campina Grande ($7^{\circ}13'20,34''S$ e $35^{\circ}52'24,48''O$), situado na mesorregião do Agreste Paraibano e que tem população estimada de 407.754 habitantes (IBGE, 2010).

Figura 11 - Localização dos reservatórios R9, R5 e R4



Os reservatórios R9 e R5 são os dois principais do sistema de distribuição de água e são responsáveis pelo recebimento das águas provenientes do sistema adutor de água tratada. A localização destes reservatórios possibilita o atendimento do maior número de economias ativas do SAACG.

O R9 (Figura 12) tem capacidade de 29.000 m³, está localizado no bairro Santa Rosa, recebe água de três adutoras de água tratada com diâmetros de 500, 700 e 800 mm e abastece as Zonas de Pressão A e D, onde se encontram aproximadamente 61% das economias atendidas pelo SAACG.

Figura 12 – Reservatório R9



Fonte: Santos (2017).

A Zona de Pressão A é caracterizada por ser a maior do sistema, com 75.345 economias, incluindo o maior bairro da cidade, Malvinas, e bairros de classe média alta como Catolé e Mirante. A Zona de Pressão D, situada a oeste da cidade, com 16.904 economias, envolve bairros como Severino Cabral e Jeremias o qual apresenta população flutuante devido a presença da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) e da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) além dos municípios Lagoa de Dentro, São José da mata e Pocinhos.

O reservatório R5 (Figura 13), localizado no bairro da Prata, apresenta capacidade de 8.000 m³. É alimentado pela adutora de 700 mm e abastece as Zonas de Pressão B e C, onde estão localizados bairros que possuem elevado índice de população flutuante, igrejas, colégios, comércios e clínicas. Estas Zonas de Pressão estão situadas na parte norte e central da cidade, possuem 50.445 economias e abrangem os bairros mais comerciais da cidade, como o Centro, Prata e Alto Branco. Nelas também estão situados os municípios de Lagoa Seca, Alagoa Nova, São Sebastião de Lagoa de Roça e Matinhas.

Figura 13 – Reservatório R5



Fonte: Santos (2017)

O reservatório R4 (Figura 14) abastece parte da Zona de Pressão C, tem capacidade de 10.000 m³ e está localizado no bairro da Palmeira sendo alimentado diretamente pelo reservatório R5. Este sistema de alimentação R5 - R4 tem ênfase nesta pesquisa a fim de possibilitar a avaliação da qualidade de água de reservatórios em série, comuns no sistema de abastecimento de água de Campina Grande.

Figura 14 – Reservatório R4



3.2 Coleta de dados operacionais e construtivos do sistema

A coleta de dados iniciou por aquisição de informações básicas das características do SAACG, discriminadas na Tabela 5, as quais são imprescindíveis na simulação da qualidade da água através de ferramenta computacional.

Tabela 5 – Características do SAACG.

Adução	Tipo (por recalque ou gravidade; água tratada), características técnicas (vazão, material, diâmetro), estado de conservação, presença de dispositivos de segurança (válvulas de bloqueio, válvulas de alívio, ventosas, tanque de acumulação unidirecional, etc.).
Estação de Tratamento	Descrição do tipo de tratamento, capacidade, estado atual de conservação.
Estação Elevatória	Curvas das bombas, características técnicas dos equipamentos eletromecânicos, incluindo <i>boosters</i> ;
Rede de distribuição	Identificação dos principais anéis, das zonas de pressão atuais, características técnicas (diâmetros, vazões, materiais), controles de vazão e pressão e descargas.
Reservatórios	Tipos (apoiado, enterrado, semi-enterrado e elevado), localização, áreas de influência, capacidade, cotas, estado de conservação.

Também foram coletados dados de projetos em plantas no formato CAD e parâmetros utilizados para o dimensionamento de várias unidades. Todas as informações foram coletadas através de consultas a técnicos, plantas, visitas técnicas a campo e trabalhos acadêmicos.

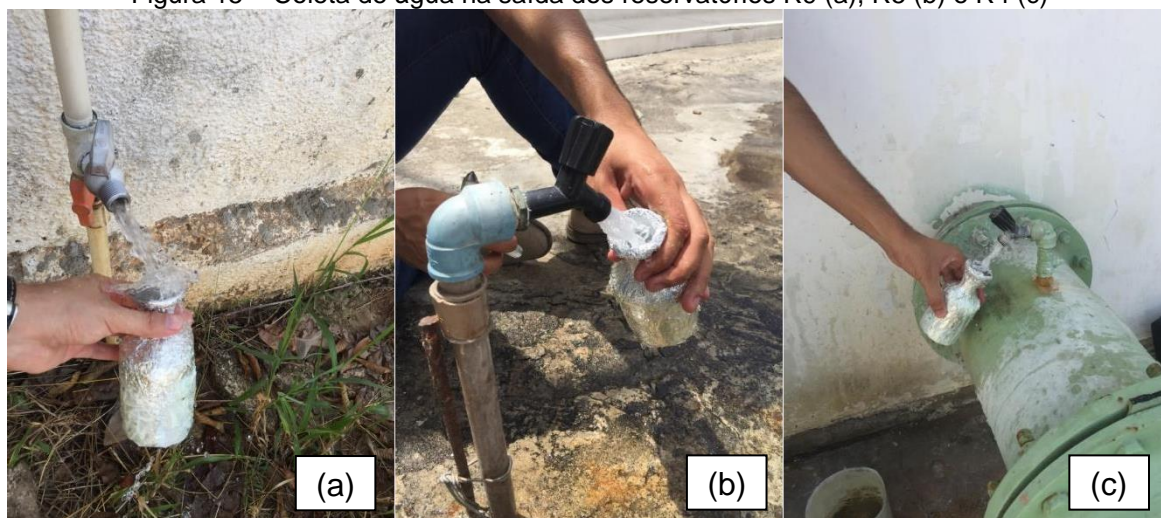
3.2.1 Coleta de dados operacionais dos reservatórios

Os dados operacionais dos reservatórios foram fornecidos pelo CCO da CAGEPA, os quais continham, boletim diário de operação, tipo de controle, dificuldades de operação, principais problemas ocorrentes no abastecimento de água e entre outras.

3.3 Coleta de dados de qualidade de água dos reservatórios

Para a determinação da qualidade da água dos reservatórios amostras eram coletadas semanalmente, no período de junho a dezembro, em torneiras na saída dos reservatórios, R9, R5 e R4 (Figura 15), no turno da manhã. Frascos tipo *Winkler* revestidos de papel alumínio foram usados na coleta para evitar a interferência da luz nas concentrações de CRL da água. Inicialmente, as torneiras eram abertas deixando-se escapar água por dois a três minutos. Em seguida a amostra era coletada e a temperatura aferida. Uma primeira análise de CRL era sempre realizada *in loco*. Após fechados, os frascos eram acondicionados em caixas térmicas e transportados para o laboratório de Saneamento da UFCG para realização do teste da garrafa.

Figura 15 – Coleta de água na saída dos reservatórios R9 (a), R5 (b) e R4 (c)



3.3.1 Métodos de análises

3.3.1.1 Cloro residual livre

A determinação do CRL foi realizada através do método titulométrico DPD. A titulação com DPD consiste na determinação das espécies de cloro residual livre através da titulação com sulfato ferroso amoniacal (SFA) utilizando N, N – dietil-p-fenilenediamina (DPD) como indicador. Na ausência de íons iodetos, o cloro livre reage rapidamente com DPD, produzindo uma coloração vermelha. A glicina (ácido aminoacético) é usada para imobilizar o cloro livre, permitindo a determinação de frações interferentes de iodo e bromo (SILVA e OLIVEIRA, 2001). A execução do método é ilustrada na Figura 16.

Figura 16 - Método titulométrico DPD - SFA



3.3.1.2 Temperatura

O monitoramento da temperatura durante os testes foi realizado por um termômetro infravermelho modelo CEM DT – 8867H tipo K 3002F (Figura 17), com acurácia de $\pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 17 – Termômetro infravermelho modelo CEM DT – 8867H tipo K 3002F



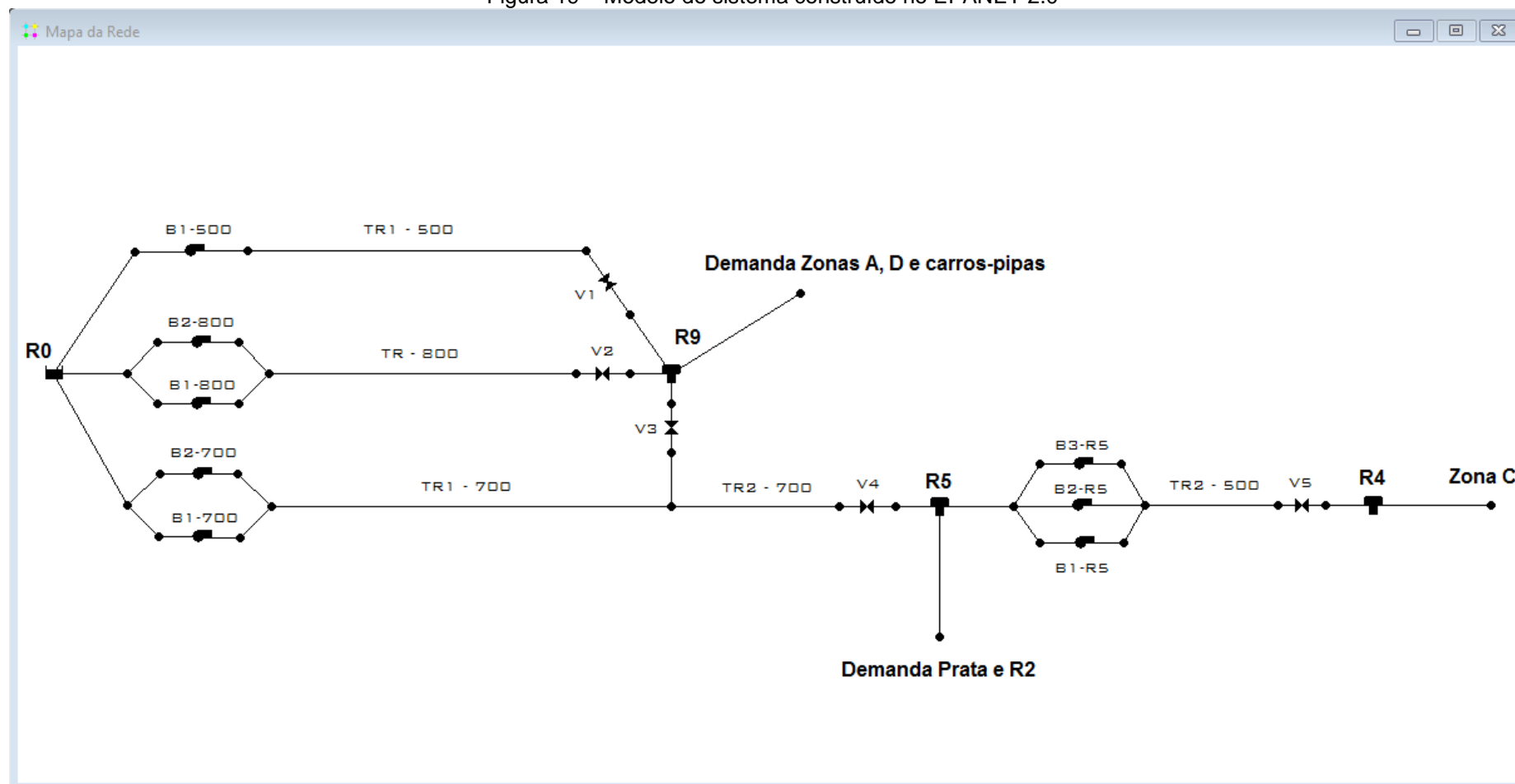
3.4 Modelagem do sistema

Após a aquisição dos dados necessários à modelagem, decorrentes de estudos anteriores (ALBUQUERQUE, 2007; MENESES, 2011 e LEAL, 2012) realizados no SAACG e de visitas técnicas e boletins de relatórios diários de funcionamento das unidades operacionais do sistema fornecidas pelo CCO da CAGEPA como, por exemplo, o da Figura 18, o modelo hidráulico foi construído no *software* EPANET 2.0, conforme pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 18 – Boletim diário do SAACG

Nº Homos	SISTEMA DE RESERVAÇÃO E ELEVÇÃO DO R-05																SISTEMA DE RESERVAÇÃO E ELEVAÇÃO DO R-04											
	RAP-05					EEAT-01 (EE-RAP-05)					01	EEAT-08 RAP-01			REL 07	RAP 02	RAP-04 Vol. (m³)					EEAT-09 REL-29 CUITES						
	C01C02		C03C04		P. Rec.	01	02	03	04	05	Vol (m³)	01	02	Vol (m³)	Niv/Vol (mm³)	Niv/Vol (mm³)	C01	C02	C03	C04	P. Rec.	01	02	Vol (m³)				
01	1.961,55	1.961,55	1.961,55	1.961,55	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,30	F	P	55,48	3,02	0,98	3,05	3,05	2,96	2,96	0,0	P	P	-			
	2,05	2,05	2,05	2,05	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,23	F	P	55,48	3,45	1,10	3,33	3,33	3,25	3,25	0,0	P	P	-			
02	1.923,49	1.923,49	1.923,49	1.923,49	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,18	P	P	55,48	3,80	1,23	3,76	3,76	3,56	3,56	0,0	P	P	-			
	2,17	2,17	2,17	2,17	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,23	F	P	55,48	3,45	1,10	3,33	3,33	3,25	3,25	0,0	P	P	-			
03	1.395,71	1.395,71	1.395,71	1.395,71	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,19	P	P	-	2,72	1,36	4,00	4,00	3,83	3,83	0,0	P	P	-			
	2,32	2,32	2,32	2,32	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,18	P	P	55,48	3,80	1,23	3,76	3,76	3,56	3,56	0,0	P	P	-			
04	1.395,71	1.395,71	1.395,71	1.395,71	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,19	P	P	-	2,72	1,36	4,00	4,00	3,83	3,83	0,0	P	P	-			
	2,62	2,62	2,62	2,62	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,19	P	P	-	2,72	1,36	4,00	4,00	3,83	3,83	0,0	P	P	-			
05	1.429,21	1.429,21	1.429,21	1.429,21	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,20	F	P	-	2,21	1,47	4,33	4,33	4,17	4,17	0,0	F	P	-			
	2,76	2,76	2,76	2,76	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,20	F	P	-	2,21	1,47	4,33	4,33	4,17	4,17	0,0	F	P	-			
06	1.491,35	1.491,35	1.491,35	1.491,35	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,77	F	P	55,48	2,60	1,49	4,26	4,26	4,15	4,15	0,5	F	P	173,45			
	2,88	2,88	2,88	2,88	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,77	F	P	55,48	2,60	1,49	4,26	4,26	4,15	4,15	0,5	F	P	173,45			
07	1.341,89	1.341,89	1.341,89	1.341,89	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,67	F	P	-	3,06	1,43	4,02	4,02	4,03	4,03	1,0	F	P	-			
	2,63	2,63	2,63	2,63	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,67	F	P	-	3,06	1,43	4,02	4,02	4,03	4,03	1,0	F	P	-			
08	1.294,50	1.294,50	1.294,50	1.294,50	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,62	F	P	-	3,11	1,41	3,85	3,85	3,89	3,89	1,5	F	P	-			
	2,50	2,50	2,50	2,50	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,62	F	P	-	3,11	1,41	3,85	3,85	3,89	3,89	1,5	F	P	-			
09	1.965,12	1.965,12	1.965,12	1.965,12	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,55	F	P	-	3,17	1,33	3,48	3,48	3,52	3,52	2,0	P	P	-			
	2,14	2,14	2,14	2,14	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,55	F	P	-	3,17	1,33	3,48	3,48	3,52	3,52	2,0	P	P	-			
10	1.965,12	1.965,12	1.965,12	1.965,12	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,55	F	P	-	3,17	1,33	3,48	3,48	3,52	3,52	2,0	P	P	-			
	2,25	2,25	2,25	2,25	53	F	F	M	F	M	1850,24	1,60	F	P	-	3,20	1,26	3,30	3,30	3,25	3,25	2,5	P	P	-			

Figura 19 – Modelo do sistema construído no EPANET 2.0



3.4.1 Dados de entrada da rede

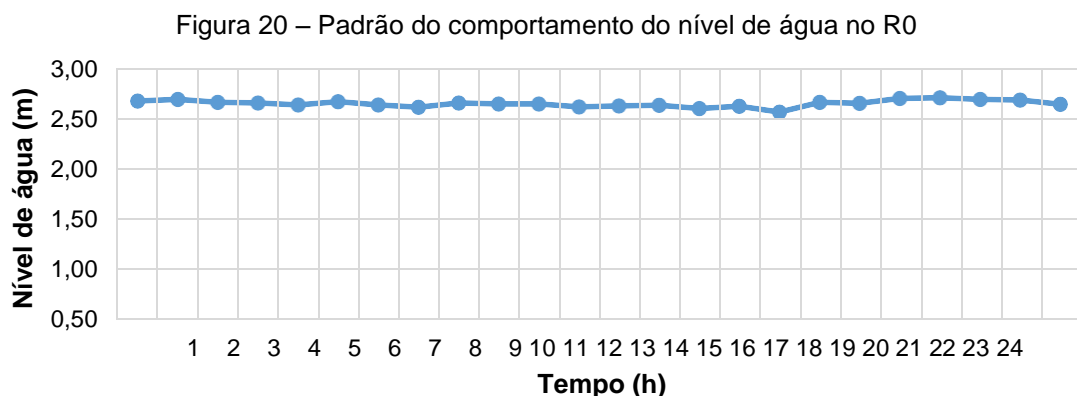
3.4.1.1 Reservatório de nível fixo

O reservatório de nível fixo (RNF) adotado como fonte de abastecimento e de origem de qualidade do sistema foi o reservatório R0, localizado na ETA-GRAVATÁ. Este reservatório trabalha na sua capacidade máxima e funciona como poço de sucção. A cota do mesmo foi obtida através da carta de curvas de nível e do uso de mapas.

O padrão de nível do R0 foi traçado a partir dos valores de leituras de nível horárias durante 24 horas obtidas através dos boletins diários, em um período de 3 meses. Estas foram relacionadas com o volume mais frequente resultando em valores incrementais ao nível de água adotado para o R0, conforme a Equação 18 apresentada por Nascimento *et al.* (2016). A Figura 20 ilustra o padrão de nível que representa o comportamento do nível de água ao longo do tempo no R0.


$$I = \frac{N_{obs}}{V_m} \quad (18)$$

onde, I – Valor incremental (m/m^3), N_{obs} – Nível de água observado (m), V_m – Volume modal (m^3).



A qualidade inicial de CRL adotada no R0 foi de $5,0 \text{ mgCl}_2/\text{L}$, correspondente ao valor mais frequente de CRL na saída do reservatório, segundo boletins de monitoramento da qualidade da água fornecidos pelo setor de controle da qualidade de água da CAGEPA. A Figura 21 apresenta exemplo de um desses boletins.

Figura 21 – Boletim diário controle físico-químico

<div>  <div> COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTOS DA PARAIBA </div> </div> <div> BOLETIM DIÁRIO CONTROLE FÍSICO-QUÍMICO - SAÍDA DO TRATAMENTO - GRAVATÁ MÊS / ANO : JULHO / 2016 QUÍMICO RESPONSÁVEL: </div>											
DIA	H	COR			TURBIDEZ			pH			Cl
		Br.	Dec.	Trat.	Br.	Dec.	Trat.	Br.	Dec.	Trat.	
19	2			5,0			0,55			7,22	5,0
	4			2,3			0,70			7,21	5,0
	6	10,6	7,3	3,9	1,05	0,51	0,64	8,34	7,70	7,33	3,0
	8			2,1			0,29			7,21	5,0
	10			3,4			0,43			7,27	5,0
	12	8,8	7,2	1,0	0,89	0,29	0,13	8,36	7,79	7,26	5,0
	14			3,0			0,26			7,25	5,0
	16			4,6			0,80			7,28	4,0
	18			5,7			0,57			7,29	5,0
	20			1,9			0,40			7,18	5,0
	22			3,7			0,66			7,16	5,0
	24	10,6	8,1	3,9	0,78	0,49	0,54	8,38	7,80	7,27	5,0
20	2			1,7			0,13			7,28	5,0
	4			2,6			0,38			7,30	5,0
	6	10,0	9,3	3,6	0,72	0,42	0,53	8,34	7,81	7,19	5,0
	8			4,7			0,46			7,34	5,0
	10			3,2			0,33			7,25	5,0
	12	10,5	8,6	4,5	0,80	0,45	0,45	8,35	7,78	7,32	5,0
	14			2,3			0,61			7,27	5,0
	16			5,0			0,40			7,28	5,0
	18	11,3	10,5	5,0	1,32	0,31	0,60	8,24	7,72	7,22	5,0
	20			3,8			0,49			7,16	5,0
	22			2,2			0,52			7,07	5,0
	24	11,5	8,6	3,4	1,43	0,33	0,15	8,33	7,67	7,22	5,0
21	2			5,0			0,10			6,94	5,0
	4			5,2			0,60			7,10	5,0
	6	10,0	7,7	2,7	0,82	0,41	0,38	8,20	7,63	6,93	5,0
	8			5,0			0,52			7,20	5,0
	10			2,9			0,66			7,14	5,0
	12	9,0	5,9	1,6	0,84	0,86	0,57	8,16	7,82	7,20	5,0
	14			3,0			0,43			7,18	5,0
	16			1,9			0,45			7,18	5,0
	18	10,1	7,9	1,3	0,89	0,76	0,50	8,22	7,74	7,20	5,0
	20			2,5			0,36			7,22	3,0
	22			2,2			0,72			7,20	5,0
	24	9,6	7,4	5,4	0,82	0,56	0,56	8,30	7,74	7,19	4,0
22	2			3,0			0,38			7,15	5,0
	4			3,2			0,57			7,28	3,0
	6	10,2	8,6	1,7	0,71	0,70	0,58	8,30	7,75	7,24	3,0
	8			5,8			1,20			7,20	5,0
	10			5,7			1,05			7,18	5,0
	12	7,2	8,1	4,0	0,79	0,77	0,50	8,34	7,85	7,25	4,0
	14			1,2			0,38			7,31	3,0
	16			2,1			0,47			7,21	5,0
	18	10,0	8,6	5,4	1,31	0,79	0,43	8,35	8,00	7,20	5,0
	20			2,8			0,39			7,19	4,0
	22			4,9			0,46			7,26	4,0
	24	10,8	9,1	4,9	0,83	0,78	0,55	8,42	7,92	7,40	3,0
23	2										
	4										
	6										
	8										
	10										
	12										
	14			4,4			0,29			7,34	4,0
	16			3,9			0,54			7,28	5,0
	18	9,0	9,0	5,2	0,80	0,84	0,28	8,42	7,76	7,29	4,0
	20			6,7			0,40			7,30	3,0
	22			6,1			0,71			7,25	5,0
	24			4,2			0,80			7,22	4,0
24	2			6,1			0,55			7,29	3,0
	4			3,2			0,80			7,30	3,0
	6			3,1			0,50			7,31	4,0
	8			4,5			0,47			7,38	3,0
	10			5,3			0,64			7,40	3,0
	12	8,9	8,8	4,0	0,96	0,83	0,37	8,33	7,80	7,39	2,0
	14			4,8			0,56			7,35	3,0
	16			4,9			0,51			7,33	3,0
	18	9,5	9,2	3,4	0,87	0,75	0,41	8,30	7,74	7,32	3,0
	20			7,2			0,49			7,17	5,0
	22										
	24										

3.4.1.2 Reservatório de nível variado

Os reservatórios R9, R5 e R4 foram considerados como reservatórios de nível variado (RNV). As cotas do terreno adotadas para eles foram obtidas da mesma forma que a cota do R0. Os níveis de água inicial, máximo e mínimo e o volume mínimo utilizados foram os valores mais frequentes no período de três meses.

As curvas de volume dos reservatórios R9, R5 e R4 (Figuras de 22, 23 e 24) foram elaboradas a partir dos níveis máximos e mínimos de cada um, estabelecendo assim, os valores intermediários para os níveis de 25%, 50% e 75% acima do nível mínimo. Esses volumes representam o comportamento dos volumes com relação à geometria dos reservatórios.

Figura 22 – Curva de volume com relação à geometria do R9

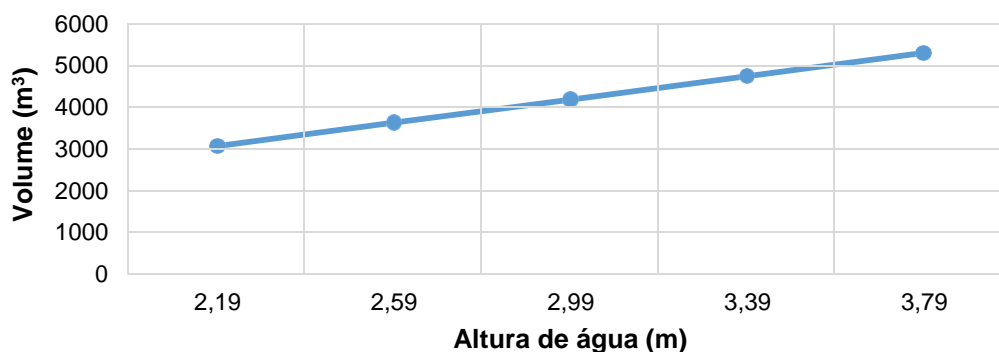


Figura 23 – Curva de volume com relação à geometria do R5

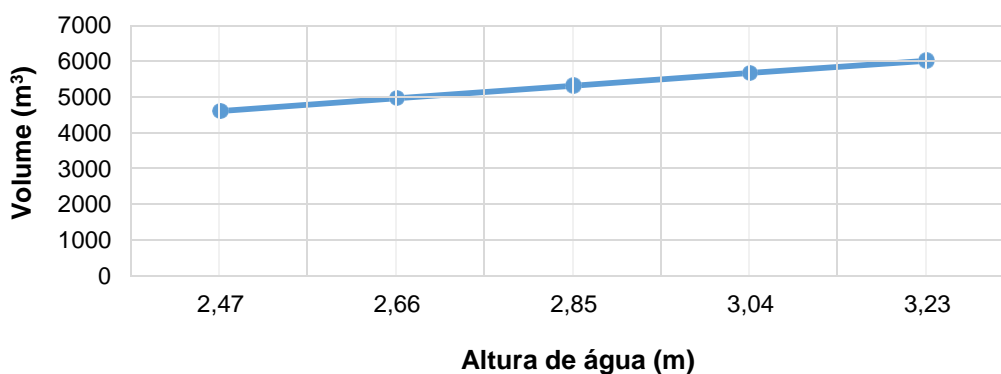
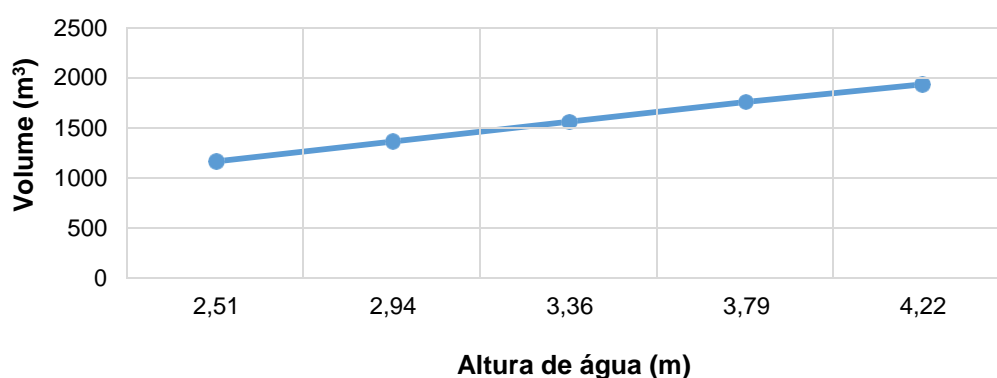


Figura 24 – Curva de volume com relação à geometria do R9



3.4.1.3 Válvulas

As válvulas V1, V2, V3, V4 e V5, elementos sustentadores de pressão virtuais, foram inseridas no modelo como artifício para garantir que a entrada de água ocorra pela parte superior dos reservatórios pois o EPANET só modela a entrada pela parte inferior. Assim, estas válvulas foram ajustadas para que a pressão na entrada dos reservatórios de rebombeamento fosse 0,1 m.c.a e nos reservatórios de distribuição de 0,05 m.c.a, conforme descrito por Meneses (2011).

3.4.1.4 Bombas

O sistema adutor de água tratada é acionado pelo funcionamento de um ou mais conjuntos motobomba, ligados em série, de acordo com a hora do dia e do nível dos reservatórios principais. A Tabela 6 apresenta as características dos conjuntos motobomba da EEAT – GRAVATÁ usados na simulação.

Tabela 6 – Características dos conjuntos motobomba da EEAT-Gravatá

Conjunto	Conjuntos em operação	Potência motor (CV)	Vazão (L/s)	Altura manométrica (m.c.a)	Adutora
B1-500	1	650	180,00	168	DN500
B1-700	1	650	397,53	159	DN700
B2-700	2	-	588,63	215	DN700
B1-800	1	900	376,00	130	DN800
B2-800	2	-	622,55	158	DN800

Fonte: adaptado de Leal (2012).

O reservatório R5 possui uma EEAT composta por 5 conjuntos motobomba funcionando simultaneamente no máximo com 3 conjuntos. A estação elevatória do R5 bombeia água para o R4 e grande parte diretamente para a rede (MENESES, 2011).

3.4.1.5 Nós

A malha simulada contém três nós, um na saída do reservatório R9, correspondente a demanda das zonas de pressão A, D e de carros-pipas, outro na saída do R5 representando a demanda do bairro da Prata e do reservatório R2 (um outro reservatório do sistema) e um outro na saída do reservatório R4 referente a demanda da zona de pressão C (Figura 19).

O consumo base foi estabelecido a partir dos relatórios do CCO da CAGEPA, do período de outubro a dezembro de 2016 e a estimativa de consumo foi realizada a partir do balanço de vazão nos reservatórios estudados. Para o cálculo dos volumes, foram utilizadas as informações de controle de níveis horários dos reservatórios, resultando em perfil diário de variação da vazão.

Os padrões de consumo dos nós correspondentes às demandas de cada reservatório foram estimados com base nos dados de variação de volume dos reservatórios, contidos nos relatórios. Assim foram calculadas todas as vazões para cada hora e estimada a vazão média horária no período adotado.

Com o objetivo de aproximar o padrão de consumo simulado do comportamento real dentro de um dia, os valores das curvas de demanda foram convertidos em fatores multiplicativos, porcentagens que representam as variações temporais da vazão mais frequente, estabelecendo um intervalo de tempo de uma

hora para cada fator, o que resultou em 24 fatores. As Figuras 25, 26 e 27 ilustram as curvas de padrão de consumo nos nós.

Figura 25 – Padrão de consumo no nó - Zonas de Pressão A, D e carros-pipas

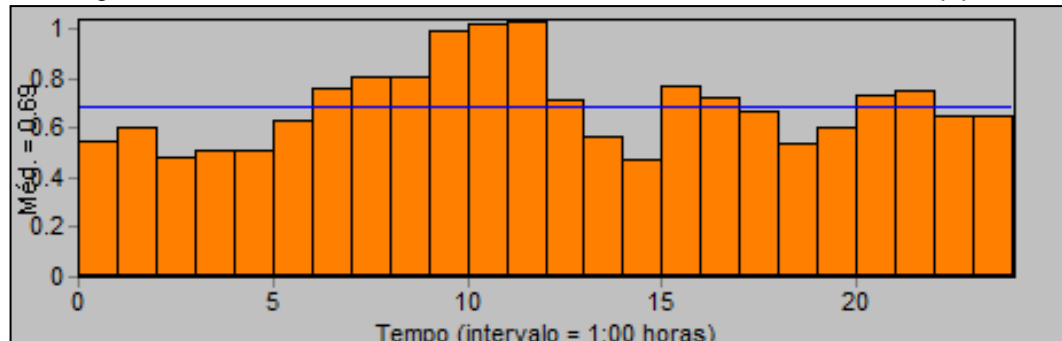


Figura 26 – Padrão de consumo no nó - Prata e R2

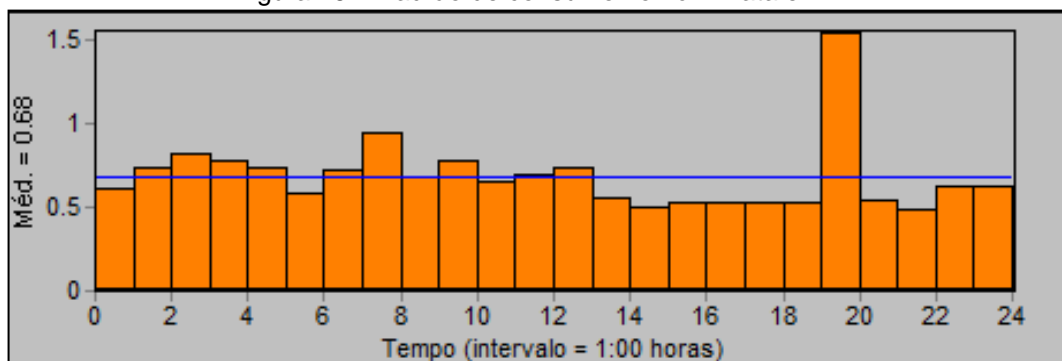
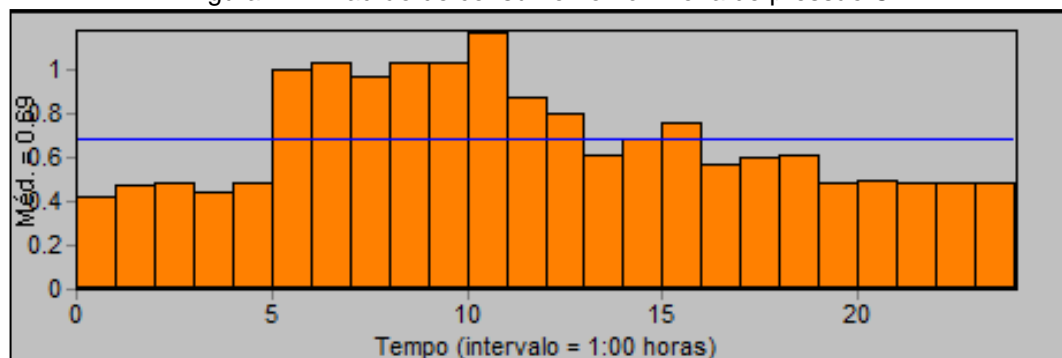


Figura 27 – Padrão de consumo no nó - Zona de pressão C



3.4.1.6 Trechos

O sistema estudado apresenta cinco trechos de adutoras. Os trechos TR1-500, TR1-700 e TR-800 interligam o reservatório R0 ao R9. O TR2-700 é uma derivação da adutora de 700 mm e abastece o reservatório R5 e o trecho TR2-500, interliga o reservatório R5 ao R4.

Os coeficientes de reação do cloro no volume do escoamento (k_b) e na parede da tubulação (k_w) adotados para o sistema adutor, foram estabelecidos em estudo

realizado por Leal (2012) no mesmo sistema através do teste da garrafa. A Tabela 7 descreve as características dos trechos de adutoras do sistema.

Tabela 7 – Características dos trechos de adutora do sistema

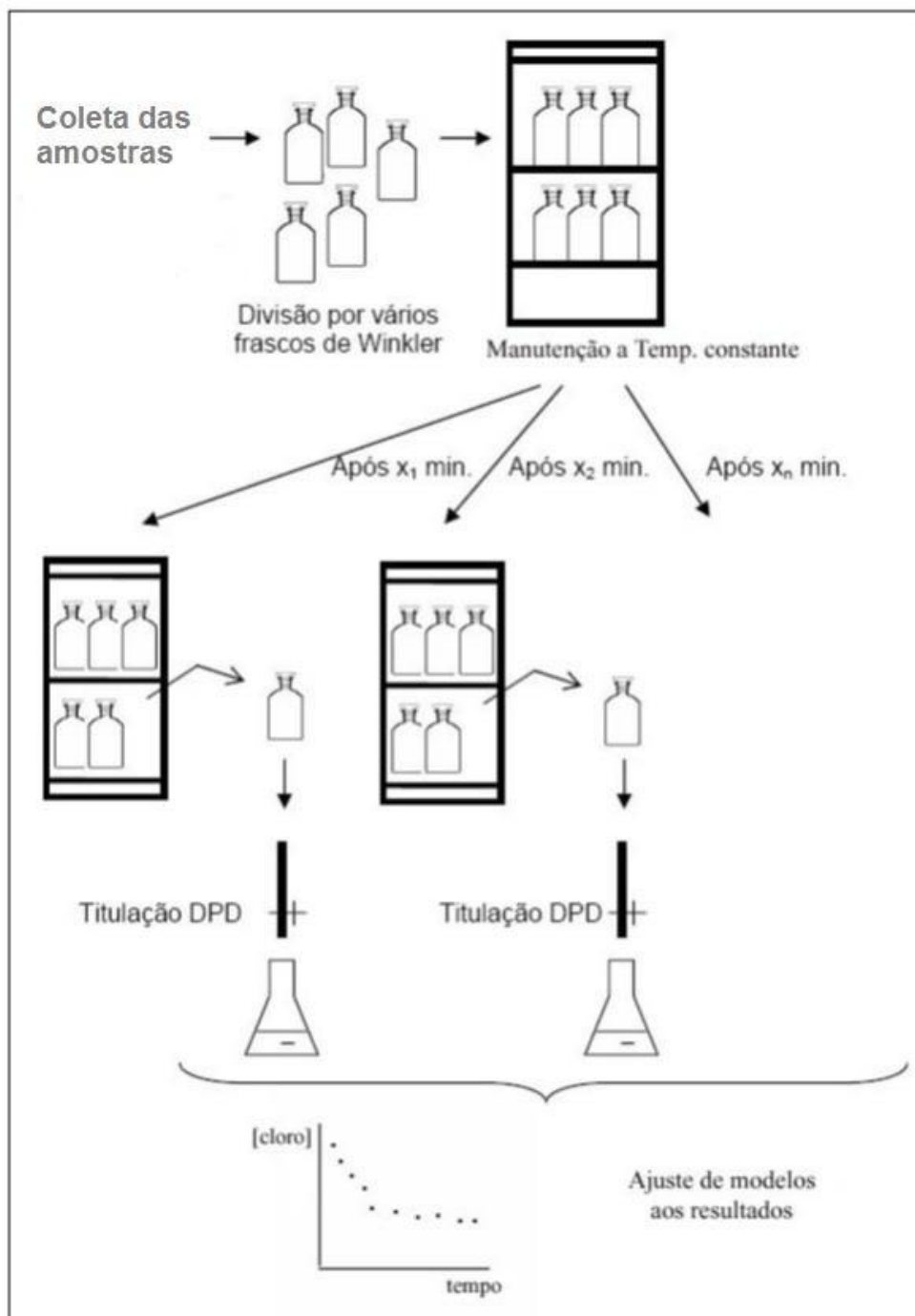
Adutora	Trechos	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Tipo de material	Coefficiente de Hazen-Williams	k_L	$k_{L_{100}}$
DN500	TR1-500	18000	487,3	Aço	100	3,80	0,00
DN700	TR1-700	18950	687,3	Aço	100	3,00	0,00
	TR2-700	1849	687,3	Aço	100		
DN800	TR-800	18000	812,3	Ferro Fundido	110	2,50	0,00
DN500	TR2-500	2500	487,3	Aço	100	3,80	0,00

Fonte: Adaptado de Leal (2012).

3.5 Determinação das constantes cinéticas de degradação de cloro residual livre nos reservatórios

O decaimento do cloro residual livre foi avaliado através do “teste de garrafa”, que permite medir unicamente o efeito das reações que ocorrem na massa líquida. Este teste consiste em coletar amostras de água em fracos âmbares, mantendo-a sob condições controladas de temperatura, luminosidade, para posterior determinação do cloro residual livre em intervalos regulares de tempo. As etapas de execução do teste são apresentadas na Figura 28.

Figura 28 – Método para a determinação da constante cinética de decaimento no seio da água



Fonte: Vieira (2002).

Os testes foram divididos em duas etapas: a primeira (Fase I) com cinco campanhas para cada reservatório, com ensaios de duração total de 75 minutos, com 15 minutos de intervalo entre uma determinação e outra, e a segunda etapa (Fase II) com uma campanha em cada reservatório, com ensaios de duração total de 1440 minutos, com intervalos crescentes. A Tabela 8 apresenta as características dos testes da garrafa.

Tabela 8 – Características dos testes da garrafa

Etapa	Duração	Ensaio	Intervalo
Fase I	75 min	1	0 min
		2	15 min
		4	30 min
		4	45 min
		5	60 min
		6	75 min
Fase II	1440 min	1	0 min
		2	10 min
		4	20 min
		4	40 min
		5	80 min
		6	160 min
		7	720 min
		8	1440 min

Após a execução do teste da garrafa, foi realizada a determinação do coeficiente K_b pelos modelos de 1ª ordem, ordem n, 1ª ordem paralela e 1ª ordem limitada.

3.6 Simulação do comportamento do cloro residual livre

Com o uso do software EPANET 2.0, foi realizada a simulação do comportamento da qualidade da água, com modelo construído a partir da planta real do sistema de abastecimento de água da cidade de Campina Grande.

O tempo de duração total da simulação foi de 336 horas, apresentando uma configuração básica com intervalos iguais a 5 segundos para os cálculos de qualidade e hidráulicos, com o objetivo de representar melhor o comportamento hidráulico e a distribuição do cloro residual livre. O uso de um tempo igual para os intervalos ajuda na coerência da simulação, devido aos módulos computacionais determinantes das condições de qualidade da água, apresentarem dependência com o modelo hidráulico (NASCIMENTO, 2016).

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes ao monitoramento das concentrações e do decaimento de cloro residual livre nos reservatórios R9, R5 e R4 e a aplicação dos resultados no *software* EPANET 2.0.

4.1 Resultados do monitoramento da concentração de CRL nos reservatórios

Foram realizadas seis amostragens na saída de cada reservatório, sendo as determinações das concentrações de CRL no instante zero realizadas *in loco*.

Os resultados do monitoramento do CRL nos reservatórios, para cada dia de amostragem, são apresentados nas Figuras 29 a 31.

Figura 29 – Monitoramento das concentrações de CRL no R9

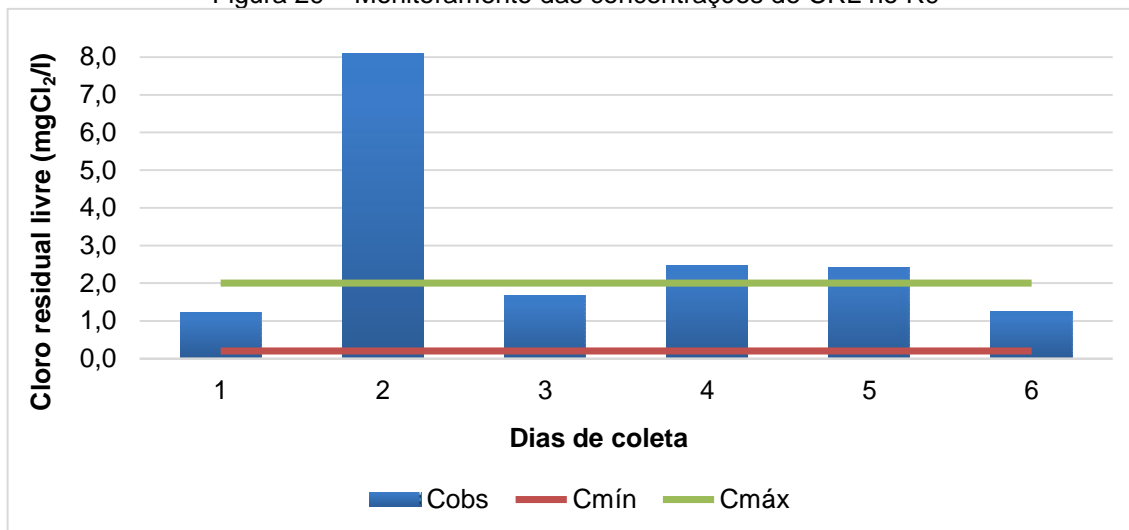


Figura 30 – Monitoramento das concentrações de CRL no R5

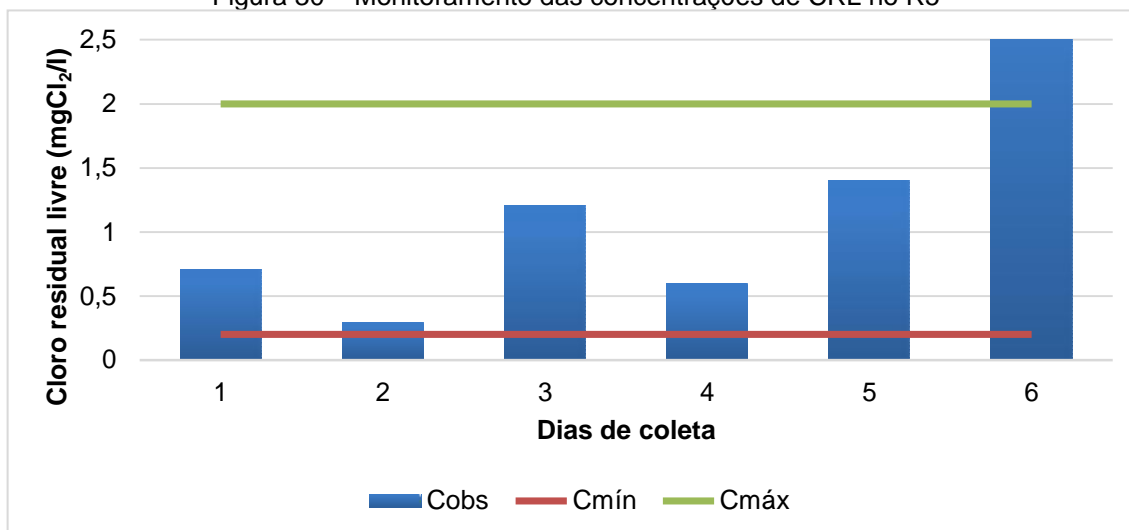
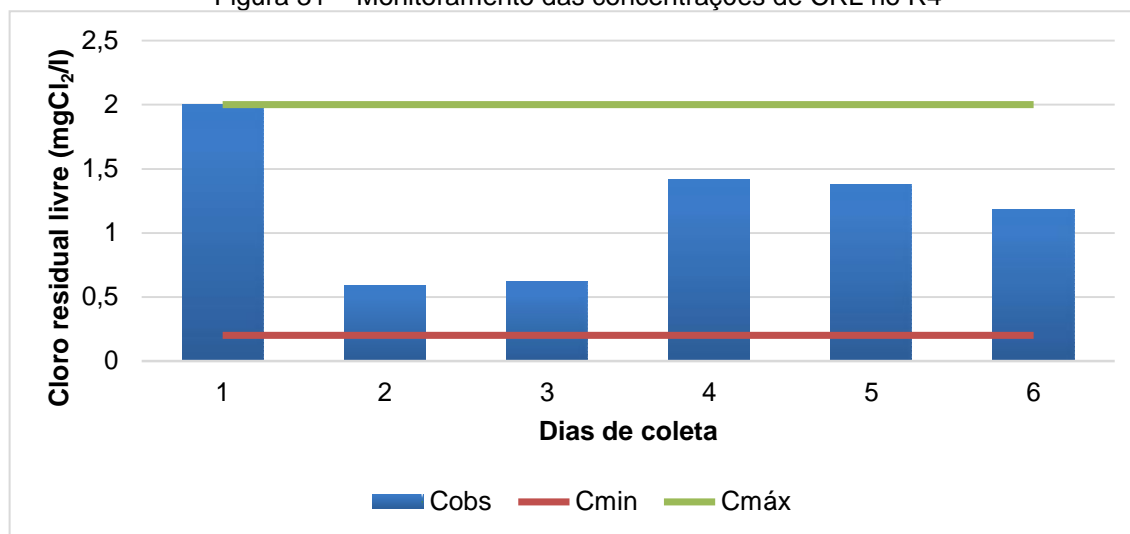


Figura 31 – Monitoramento das concentrações de CRL no R4



Os valores do CRL determinados estão em conformidade com a Portaria MS 2.914/2011 que estabelece o valor mínimo de 0,2 mgCl₂/L e um máximo recomendado de 2,0 mgCl₂/L, em qualquer ponto do sistema de distribuição, podendo ser alcançado um valor máximo permitido (VMP) de 5,0 mgCl₂/L, sendo verificado que todas as concentrações ficaram acima do valor mínimo permitido pela Portaria. Os testes 4 e 5 do R9 e o teste 6 do R5 apresentaram concentrações superiores ao valor máximo recomendado e o teste 2 do R9, concentração superior ao VMP. Os demais testes ficaram dentro da faixa recomendada.

4.2 Decaimento do cloro nos reservatórios

4.2.1 Teste da garrafa

O estudo do decaimento do cloro residual no volume de água foi baseado no teste da garrafa, através da determinação das concentrações de CRL em intervalos de tempo pré-definidos, sob condições controladas de temperatura e luminosidade.

Os decaimentos de CRL ao longo do tempo, em suas respectivas campanhas de análise nas Fases I e II, foram plotados em gráficos, conforme apresentado nas Figuras 32 a 35.

Figura 32 – Teste da garrafa no reservatório R9, na Fase I

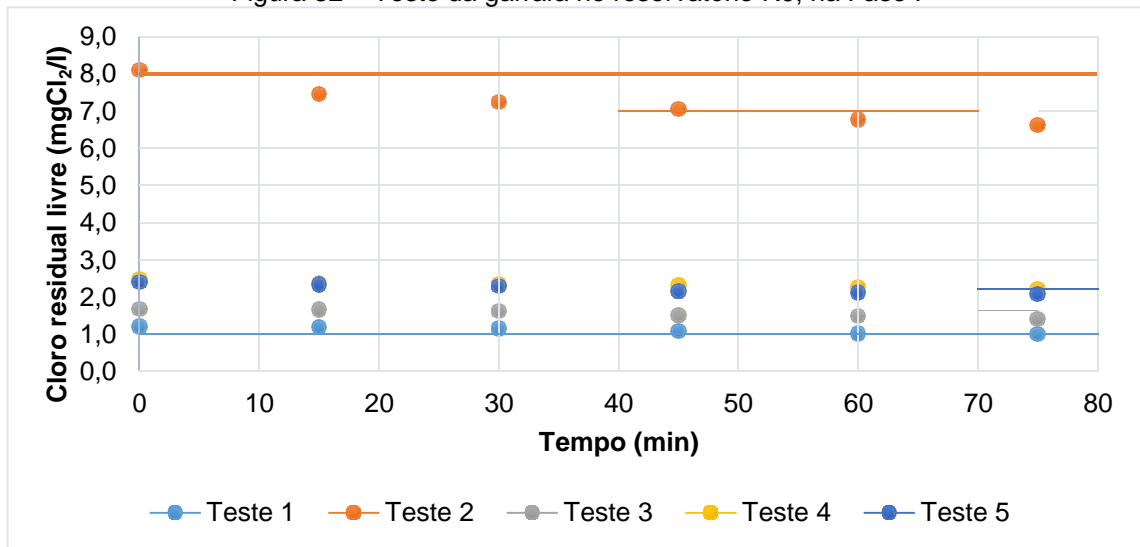


Figura 33 – Teste da garrafa para o reservatório R5, na Fase I

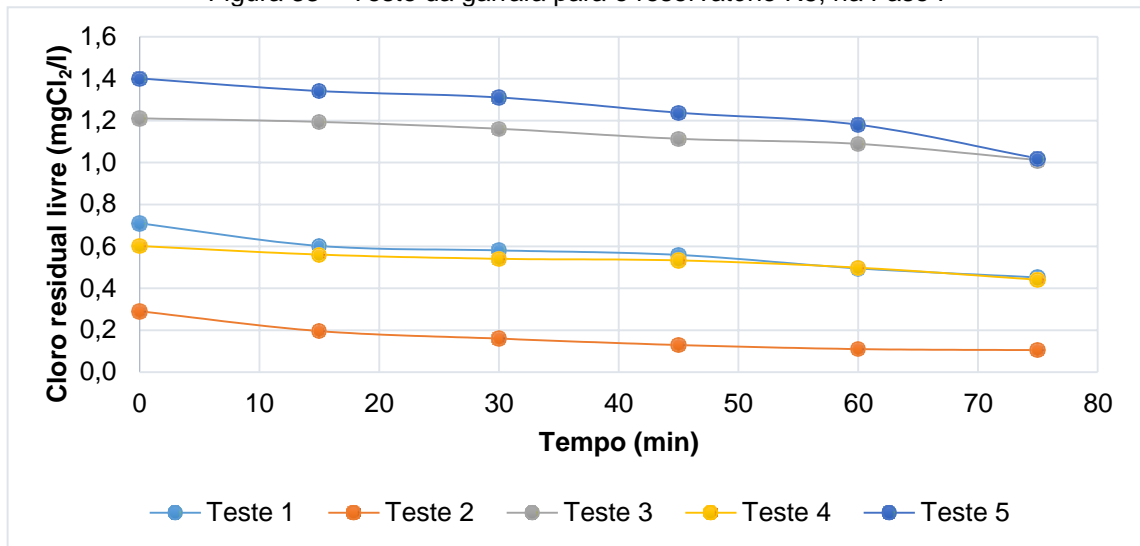


Figura 34 – Teste da garrafa para o reservatório R4, na Fase I

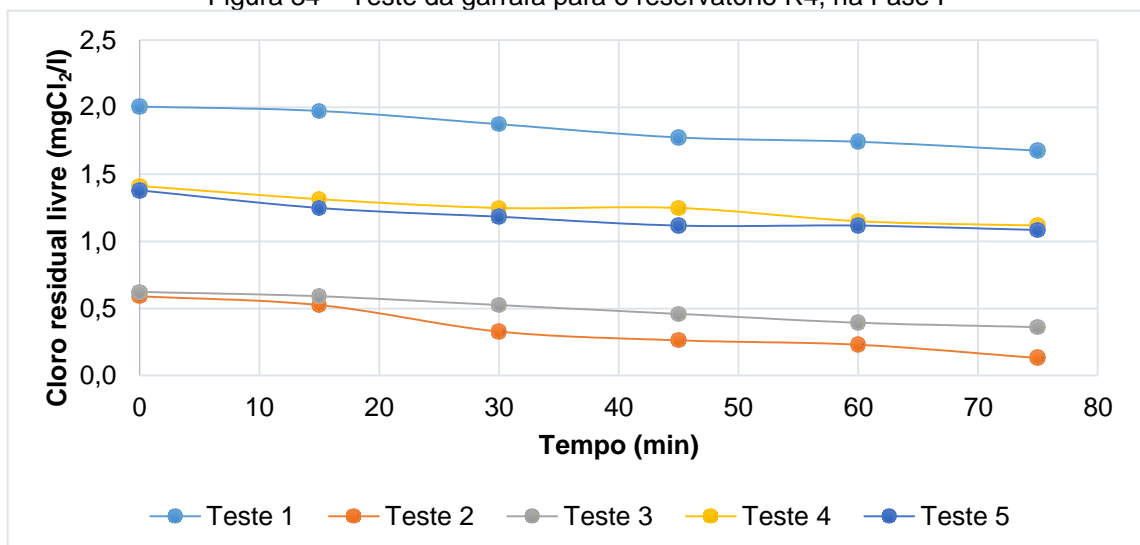
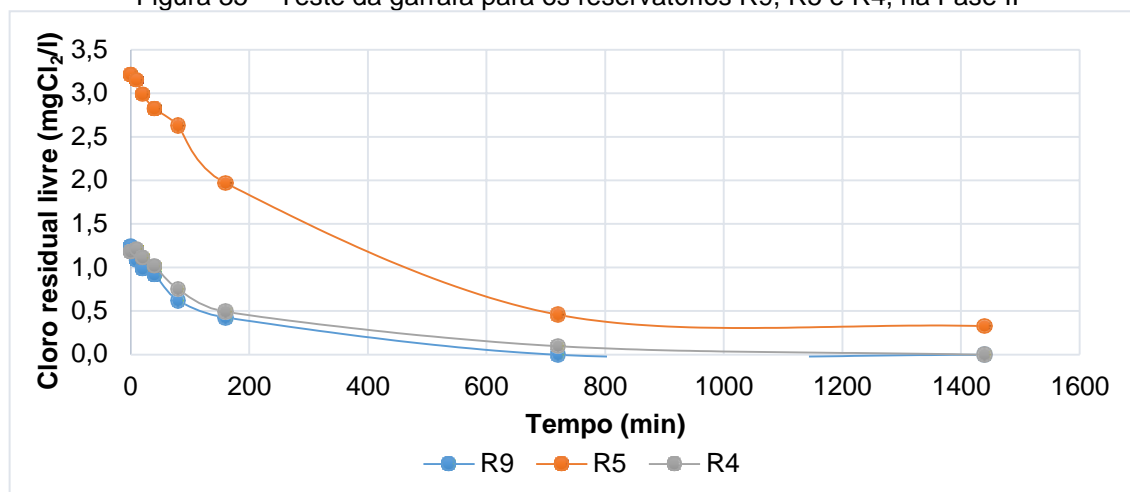


Figura 35 – Teste da garrafa para os reservatórios R9, R5 e R4, na Fase II



A realização dos ensaios teve como objetivo determinar as constantes cinéticas de decaimento do CRL na massa líquida (k_b), sendo possível prever, em determinados limites, a velocidade em que ocorrem as reações do cloro com diversos compostos presentes na água. De acordo com as figuras apresentadas, pode ser verificado que o CRL em solução vai diminuindo ao longo do tempo, devido a reações de oxirredução com as espécies químicas e microbianas presentes na água.

Para a Fase I foi observada um único estágio para o decaimento do CRL, enquanto que para a Fase II existe um estágio inicial, em que o decaimento é mais acentuado, e outro estágio, no qual o decaimento vai se tornando mais lento. Esse comportamento verificado nos gráficos é confirmado por Vieira et al. (2004), que afirma que a fase inicial pode durar em média duas horas, sendo esse tempo variável, dependendo da concentração inicial de cloro.

A temperatura, por ser um fator que está diretamente relacionada à velocidade de reação do cloro na água, foi monitorada durante a realização do teste, sendo seus valores médios apresentados, para cada reservatório, na Tabela 1Tabela 9.

Tabela 9 – Temperatura média para cada teste, nas Fases I e II.

		FASE I					FASE II
		Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6
R9	Data	02/07/16	03/07/16	09/08/16	10/08/16	16/08/16	14/12/16
	T (°C)	25,0	25,4	25,8	25,6	26,1	28,0
R5	Data	02/06/16	08/06/16	09/06/16	16/06/16	30/06/16	28/10/16
	T (°C)	26,0	25,9	26,3	25,3	25,5	27,0
R4	Data	04/11/16	10/11/16	11/11/16	18/11/16	25/11/16	02/12/16
	T (°C)	26,8	28,2	27,1	27,0	28,8	27,4

4.2.2 Modelos cinéticos de decaimento

A determinação dos coeficientes cinéticos de degradação de cloro residual livre foi realizada através de ajustes de modelos, de 1ª ordem, 1ª ordem limitada, 1ª ordem paralela e ordem n, aos dados experimentais obtidos pelo teste da garrafa para as Fases I e II, sendo esses ajustes realizados com base no método dos mínimos quadrados, usando a ferramenta *Solver* do *software* Excel 2013.

4.2.2.1 Fase I

As Figuras de 36 a 38 ilustram os ajustes dos modelos para os testes de decaimento de CRL na Fase I, referentes aos reservatórios R9, R5 e R4, respectivamente. Cada uma dessas figuras corresponde a um teste selecionado como típico para o respectivo reservatório.

Figura 36 – Decaimento do cloro residual livre na água do reservatório R9

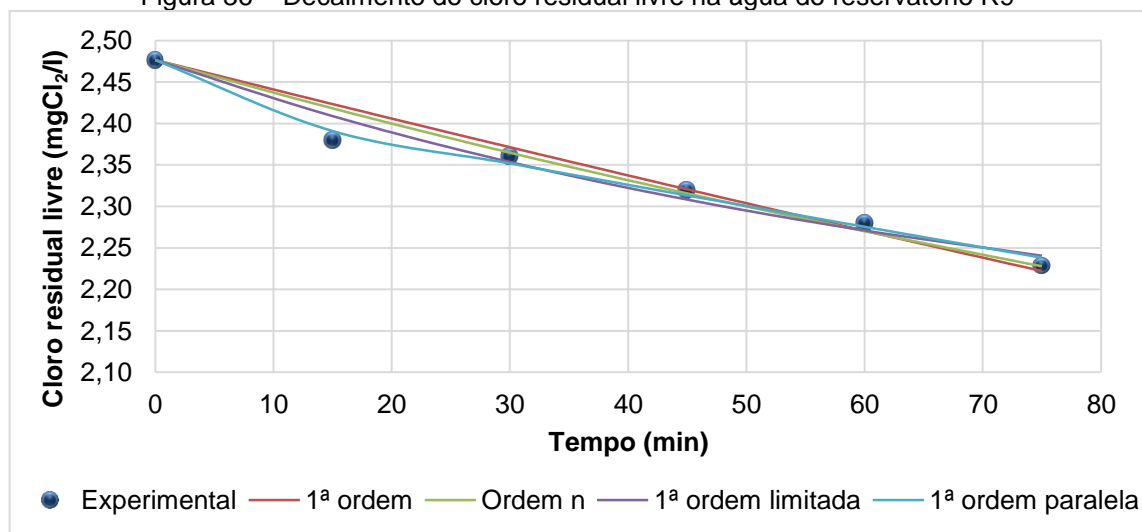


Figura 37 – Decaimento do cloro residual livre na água do reservatório R5

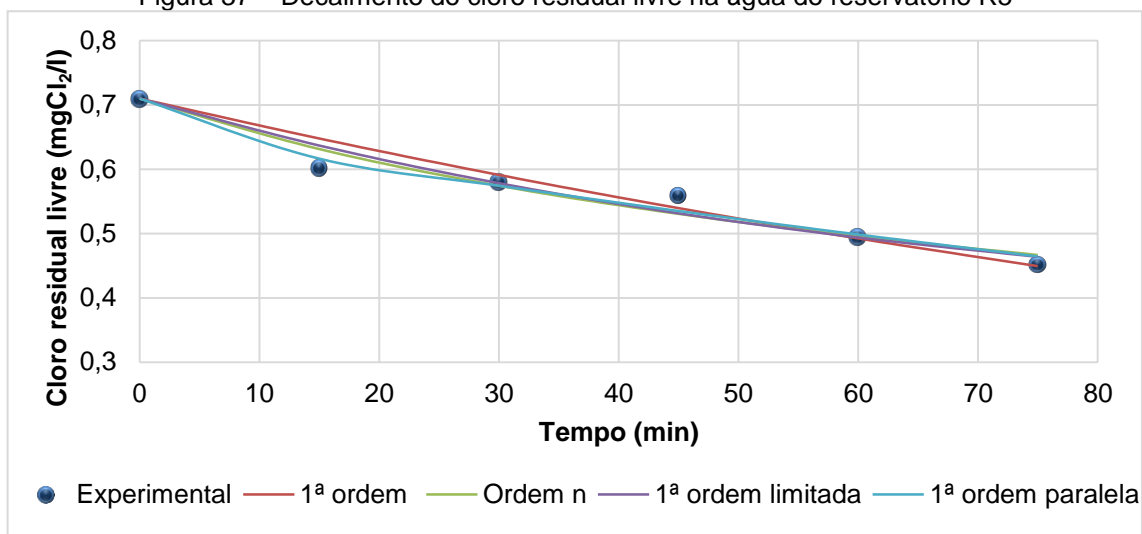
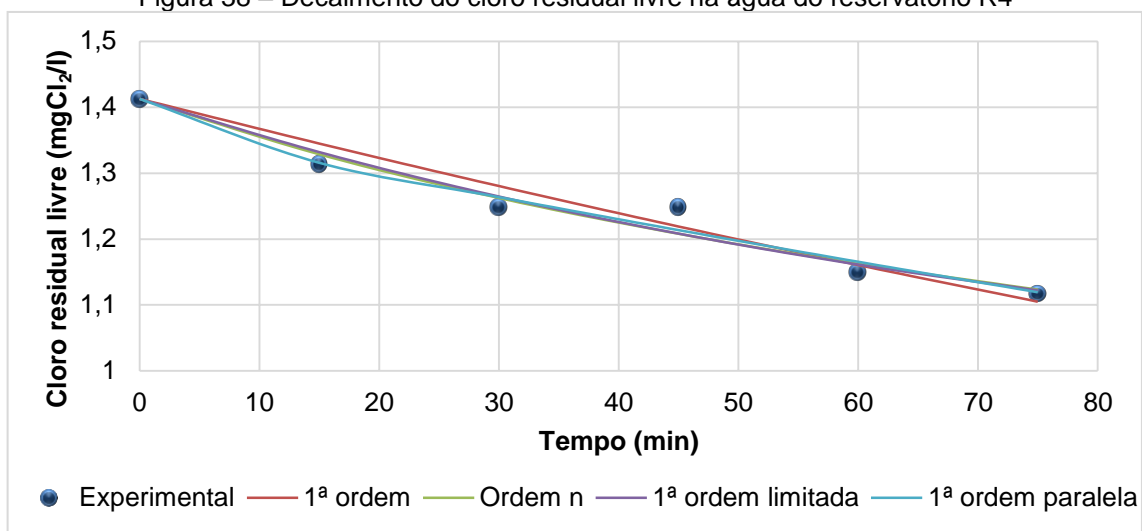


Figura 38 – Decaimento do cloro residual livre na água do reservatório R4



A Tabela 10 apresenta os valores dos coeficientes de decaimento do cloro residual livre e seus respectivos coeficientes de correlação para cada modelo estudado, na Fase I, com base em experimentos considerados típicos para os reservatórios analisados.

Tabela 10 – Resultados dos ajustes aos resultados dos ensaios da Fase I.

Modelos Cinéticos	Parâmetros ajustáveis	C_0 (mgCl ₂ /L)		
		R9	R5	R4
		2,48	0,71	1,41
1ª ordem	k	0,0014	0,0061	0,0033
	R	0,9708	0,9675	0,9730
Ordem n	k	0,00013	0,0176	0,0015
	n	3,8	3,02	4,2
	R	0,9782	0,9758	0,9807
1ª ordem limitada	k	0,0132	0,0147	0,0120
	C*	2,1025	0,3414	0,9242
	R	0,9830	0,9734	0,9796
1ª ordem paralela	k ₁	0,0012	0,0047	0,0028
	k ₂	0,2216	0,6391	0,1909
	x	0,985	0,932	0,975
	R	0,9938	0,9874	0,9846

k, k₁ e k₂, coeficientes cinéticos de decaimento; R, coeficiente de correlação; n, ordem da reação; C*, concentração limite de cloro; x, fração de cloro.

A maioria dos autores tende a considerar o coeficiente de correlação como principal critério para a hierarquização no processo de escolha dos modelos cinéticos. Como pode ser verificado os coeficientes de correlação referentes ao ajuste de todos os modelos cinéticos foram muito elevados, superiores a 0,96, mas os modelos de 1ª ordem limitada, 1ª ordem paralela e ordem n, apresentaram coeficientes mais elevados e mais semelhantes entre si.

Os coeficientes de correlação referentes ao modelo de 1ª ordem paralela foram os mais elevados o que, à primeira vista, parece demonstrar um melhor ajuste do modelo, conforme descrito por Vieira et al. (2004) e Beleza (2005). Mas, um exame mais acurado dos coeficientes k₁ e k₂ mostra uma contradição no significado desses coeficientes os quais devem descrever reações rápidas e lentas, respectivamente. O ajuste, no entanto, mostra o contrário, o que deve estar associado ao relativamente curto período, somente 75 minutos, de duração do teste da garrafa, sugerindo que esse modelo só deve ser considerado para ensaios de longa duração.

Pelo critério do coeficiente de correlação, os modelos de ordem n e de primeira ordem limitada apresentam bons resultados, mas o software simulador EPANET 2.0 apresenta limitações para a simulação do decaimento do cloro residual

livre conforme esses modelos cinéticos. O simulador exige o uso de uma única ordem n para a simulação do comportamento do desinfetante, mas os resultados mostraram diferentes ordens para os três reservatórios analisados, inviabilizando a adoção desse modelo para simulação. Por seu turno, a adoção do modelo de primeira ordem limitada exigiria a introdução de rotinas de programação que possibilitassem a inserção dos valores da concentração do desinfetante que não reage (C^*). Assim, apesar de apresentar o menor coeficiente de correlação, o modelo de primeira ordem, em virtude de ser amplamente reconhecido como capaz de representar o comportamento cinético do cloro residual livre, além de ser mais simples computacionalmente, entre outras vantagens, foi o modelo escolhido para a aplicação no simulador.

4.2.2.2 Fase II

As Figuras de 39 a 41 apresentam os ajustes dos modelos para os testes de decaimento de CRL na Fase II, referentes aos reservatórios R9, R5 e R4, respectivamente.

Figura 39 – Decaimento do cloro no reservatório R9, Fase II

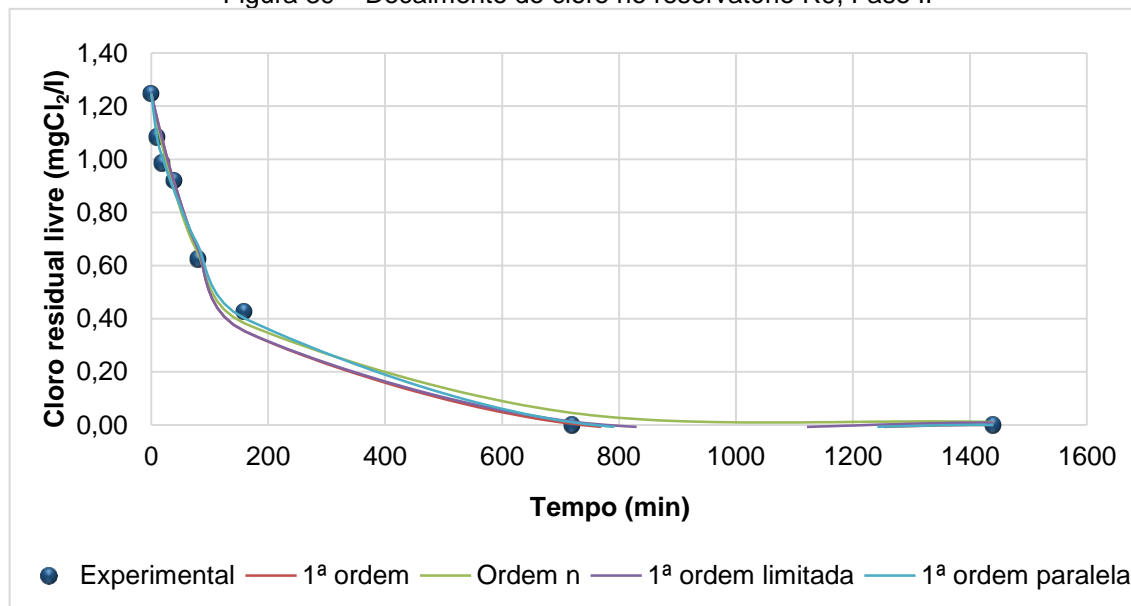


Figura 40 – Decaimento do cloro no reservatório R5, Fase II

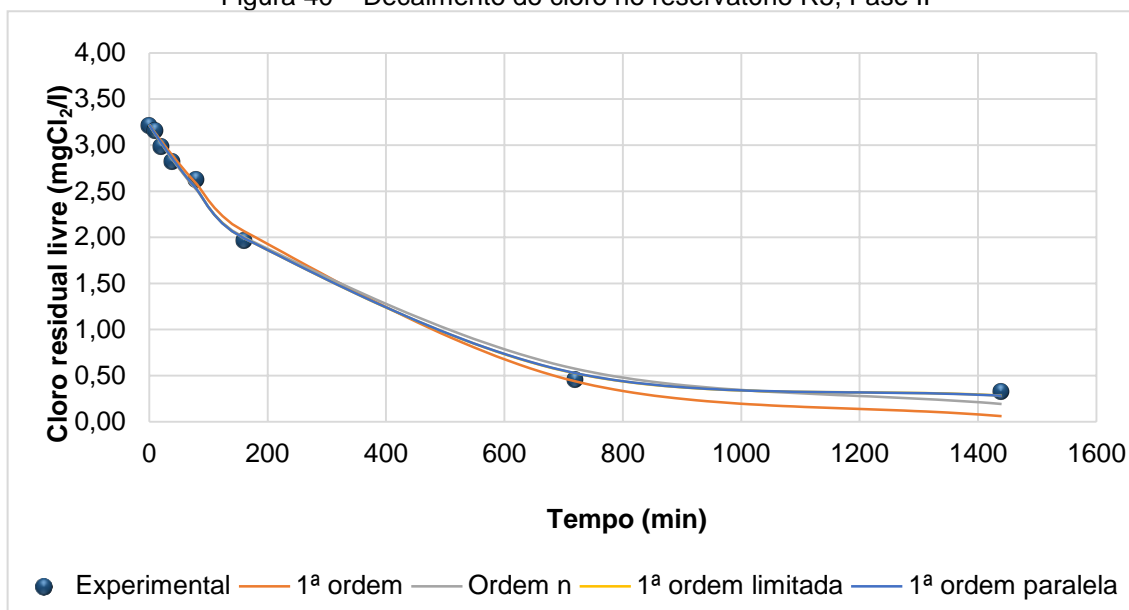
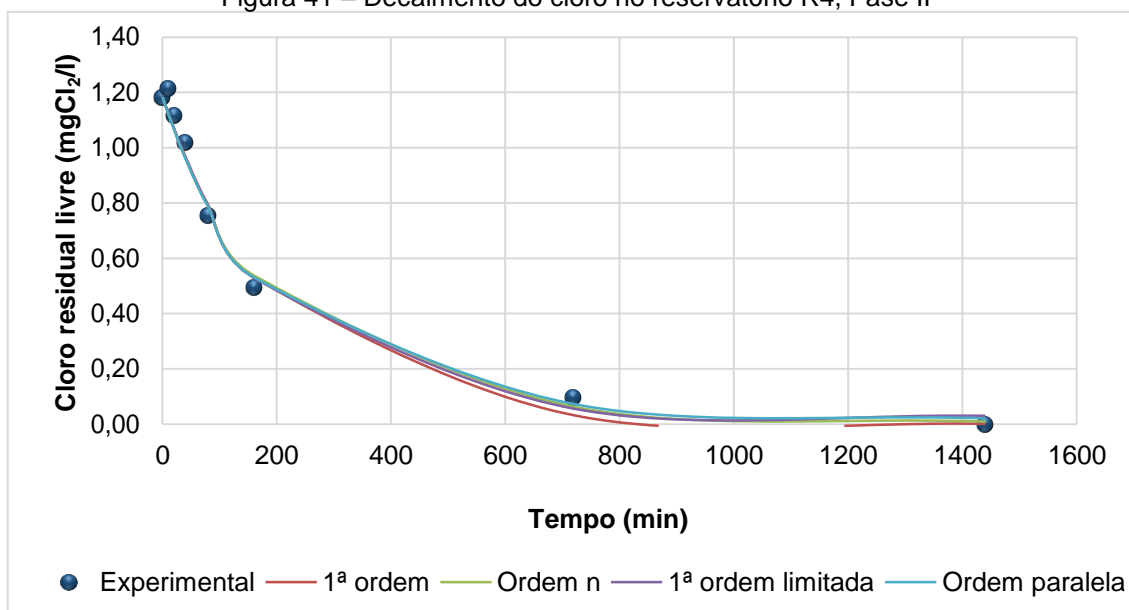


Figura 41 – Decaimento do cloro no reservatório R4, Fase II



A Tabela 11 apresenta os valores dos coeficientes constantes de velocidade de decaimento de cloro residual livre e seus respectivos coeficientes de determinação para cada modelo, na Fase II da pesquisa.

Tabela 11 - Resultados dos ajustes aos resultados dos ensaios da Fase II.

Modelos Cinéticos	Parâmetros ajustáveis	C_0 (mgCl ₂ /L)		
		R9	R5	R4
		1,25	3,22	1,21
1ª ordem	k	0,0079	0,0028	0,0050
	R	0,9943	0,9953	0,9964
Ordem n	k	0,0086	0,0022	0,0051
	n	1,4	1,3	1,2
	R	0,9962	0,9975	0,9971
1ª ordem limitada	k	0,0080	0,0034	0,0052
	C*	0,009	0,259	0,029
	R	0,9943	0,9972	0,9970
1ª ordem paralela	k ₁	0,2118	0,0016	0,0058
	k ₂	0,0065	0,0048	0,0014
	x	0,087	0,514	0,864
	R	0,9983	0,9988	0,9974

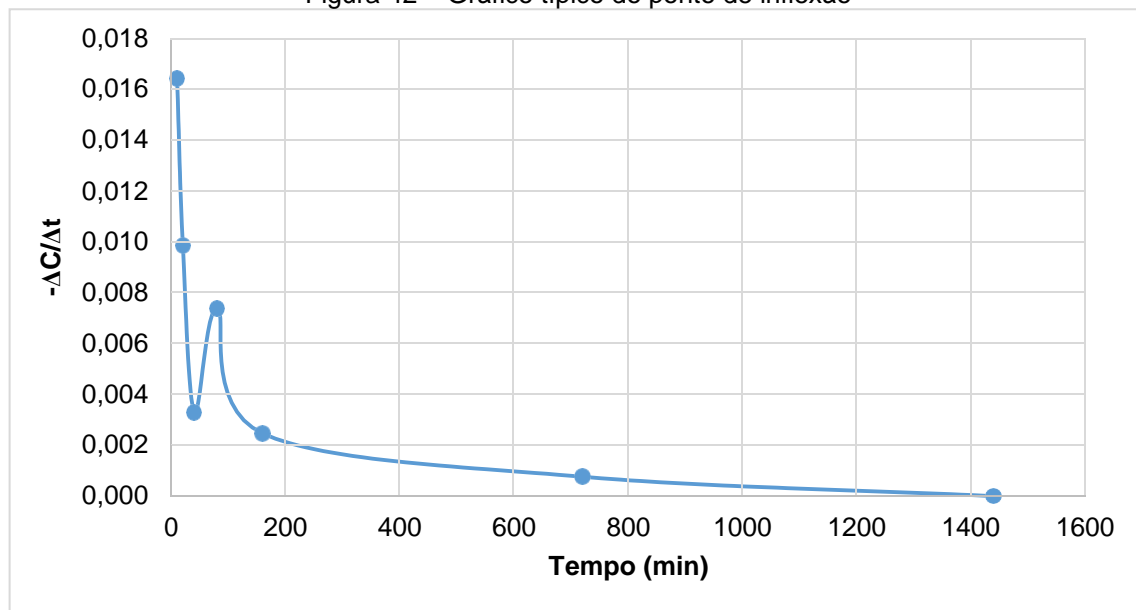
k, k₁ e k₂, coeficientes cinéticos de decaimento; R, coeficiente de correlação; n, ordem da reação; C*, concentração limite de cloro; x, fração de cloro.

Na Fase II também foi verificado que os coeficientes de correlação referentes ao ajuste de todos os modelos cinéticos foram muito elevados e bastante semelhantes entre si. Os coeficientes de correlação referentes ao modelo de 1ª ordem paralela foram os mais elevados, como na Fase II o ensaio foi de longa duração, esse modelo apresentou melhores ajustes.

O fato do modelo de 1ª ordem paralela proporcionar melhores ajustes confirma os resultados obtidos por Vieira (2004) e Beleza (2005) para o decaimento do cloro no seio da água. As duas constantes cinéticas k₁ e k₂, com valores diferentes, correspondem ao estágio inicial de decaimento mais rápido caracterizado por k₁, e ao segundo estágio de decaimento mais lento caracterizado por k₂. Pode-se também afirmar que a fração do cloro xC₀ é a que reage com as espécies mais reativas (como amônia e ferro), e a fração (1-x)C₀ reage com espécies menos reativas (matéria orgânica) conforme observado por Vieira et al. (2004).

A Figura 42 ilustra o gráfico típico do ponto de inflexão para o ajuste do modelo de 1ª ordem paralela no teste da Fase II. Esse ponto de inflexão, por volta dos 80 minutos do teste, determina a mudança de predominância de k₁, o qual governa a reação do cloro com espécies mais reativas, para a de k₂, que governa a reação do cloro com espécies menos reativas.

Figura 42 – Gráfico típico do ponto de inflexão



4.3 Simulação do decaimento do cloro

A simulação foi desenvolvida no *software* EPANET 2.0 com base nas informações encontradas em Meneses (2011), Leal (2012) e Albuquerque (2010) e nas fornecidas pelo CCO da CAGEPA.

As simulações foram realizadas da seguinte forma:

- Foram feitas simulações utilizando os coeficientes cinéticos de decaimento do cloro na massa líquida, gerados pelos modelos de 1ª ordem e 1ª ordem paralela. Para o modelo de 1ª ordem paralela foi adaptado um k_b , tendo sido selecionado o k_2 gerado para cada reservatório.
- Não foi possível realizar simulações utilizando o modelo de 1ª ordem limitada e ordem n, devido a limitações do *software* EPANET 2.0 para aplicação desses modelos;
- A constante de decaimento na parede (k_w) foi considerada desprezível para os reservatórios e para as tubulações que compõem a rede simulada. Segundo Danieli et al. (2006), o k_w revelou pouca interferência em grandes diâmetros de tubulação, podendo ser considerado nulo;
- O tempo utilizado para a simulação foi de 336 horas, equivalente a um período de duas semanas.

Como observado foram obtidos vários valores para k_b , conforme o ajuste de cada modelo aplicado. Logo, foram elaborados cenários de simulação para a aplicação dos coeficientes obtidos nos modelos de 1ª ordem e 1ª ordem paralela, escolhidos devido a simplicidade de aplicação e representação das reações do desinfetante em solução. Os cenários elaborados são descritos a seguir.

- Cenário 1: Simulação do comportamento do CRL, aplicando o k médio encontrado no modelo de 1ª ordem para a Fase I;
- Cenário 2: Simulação do comportamento do CRL, aplicando o k_2 médio encontrado no modelo de 1ª ordem paralela para a Fase I;
- Cenário 3: Simulação do comportamento do CRL, aplicando o k encontrado no modelo de 1ª ordem para a Fase II;
- Cenário 4: Simulação do comportamento do CRL, aplicando o k_2 encontrado no modelo de 1ª ordem paralela para a Fase II.

As Figuras 43 e 44 apresentam o perfil temporal da concentração de CRL na simulação dos Cenários 1 e 2 para os reservatórios R9, R5 e R4.

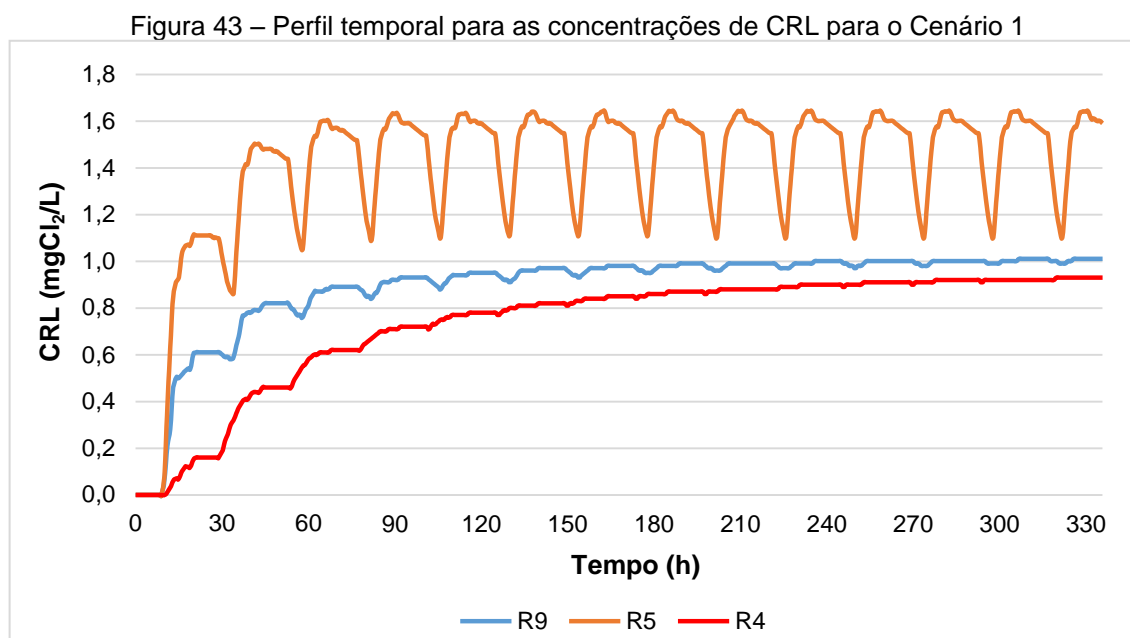
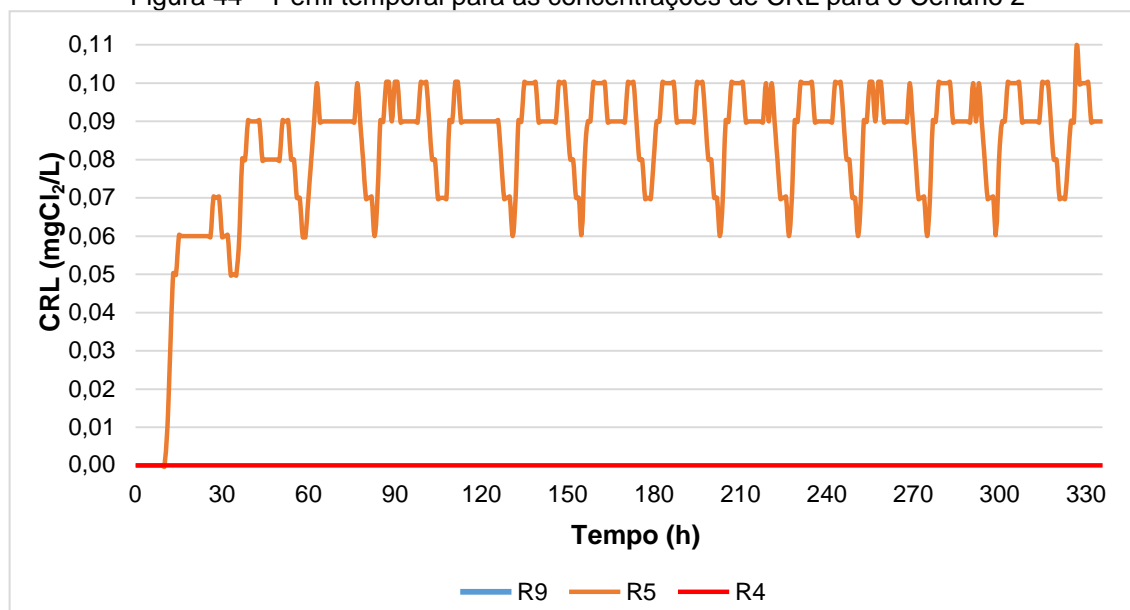


Figura 44 – Perfil temporal para as concentrações de CRL para o Cenário 2



No Cenário 1, correspondente à aplicação do k_b obtido no modelo de 1ª ordem na Fase I, pode ser observado que o reservatório R5 apresenta uma concentração de cloro mais elevada e uma variação considerável no ciclo diário. O R5 apresenta esse comportamento devido ao seu regime de operação; por operar como poço de sucção, experimenta renovação contínua de água. A queda da concentração observada no gráfico coincide com o período de maior consumo, a partir das 17h. Logo após, a concentração de cloro vai aumentando conforme a entrada de água nova.

Já para os outros reservatórios é observado que não há o ciclo de variação da concentração de cloro. Depois de um determinado tempo, as concentrações tendem a se manter devido ao regime de operação.

O R9, por ser o maior reservatório e por abastecer uma grande parte do SAACG, possui características de um reservatório de distribuição com maior tempo de detenção hidráulica, explicando a degradação da concentração de CRL.

O reservatório R4 possui uma curva de comportamento do cloro, parecida com a curva do R9, por apresentar características de operação parecidas. No entanto, o R4 está ligado em série com o R5, sendo alimentado por esse último, apresentando concentrações baixas, devido a esse tipo de configuração. O maior trajeto que a água percorre para chegar ao R4, também exerce influência negativa na sua concentração.

Para o Cenário 2 foram observados valores zero de concentração de cloro para os reservatórios R9 e R4 e baixíssimos valores para o R5. Isso indica que, para a Fase I o modelo de 1ª ordem paralela não se aplica, pois, o tempo do teste foi suficiente apenas para caracterização do estágio inicial de decaimento mais rápido do cloro representado por k_1 , sendo insuficiente para caracterizar o k_2 que representa o estágio de decaimento mais lento do cloro. Assim, ocorrendo apenas às reações características do coeficiente k_1 .

As Figuras 45 e 46 apresentam o perfil temporal da concentração de CRL para a simulação dos Cenários 3 e 4, efetuada para os reservatórios R9, R5 e R4.

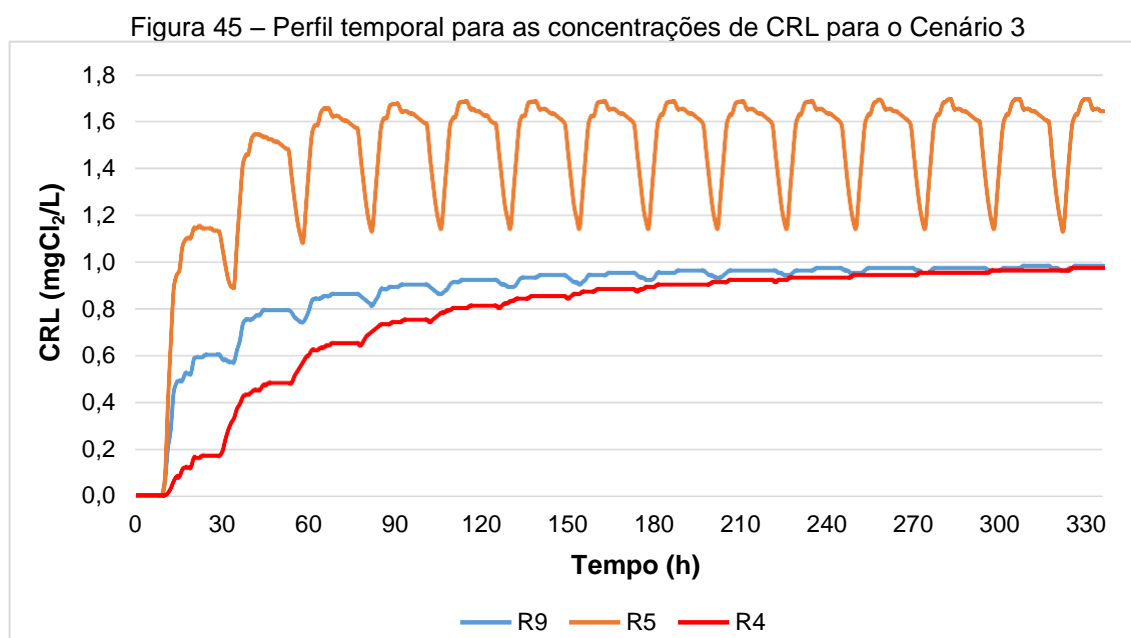
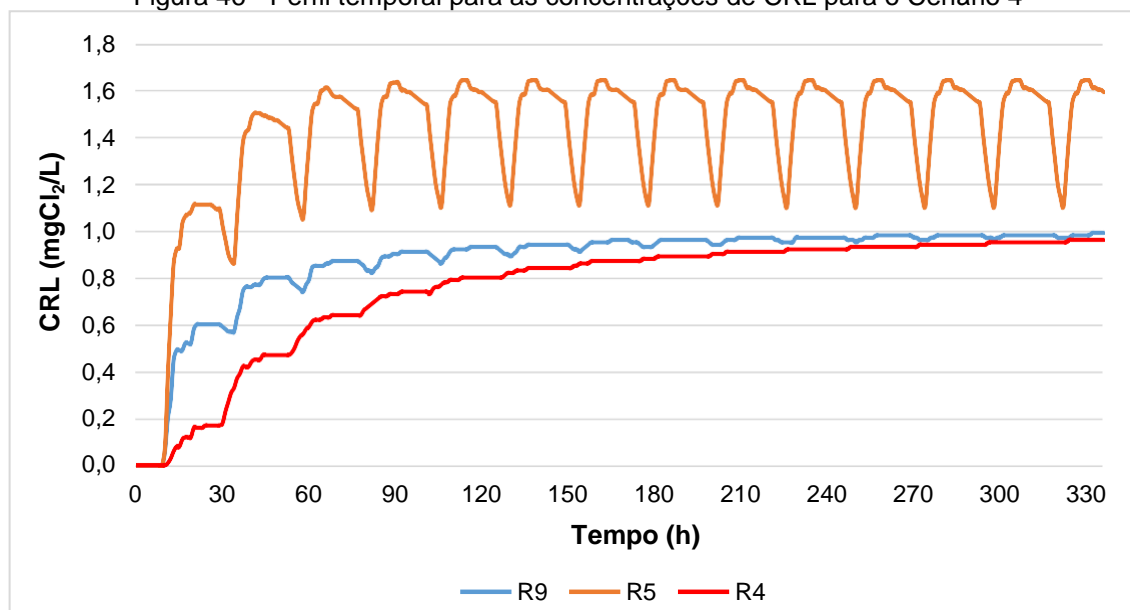


Figura 46 - Perfil temporal para as concentrações de CRL para o Cenário 4



Como pode ser facilmente verificado, para os Cenários 3 e 4, as curvas do comportamento do cloro foram bastante semelhantes, apresentando uma pequena variação de concentração entre os cenários. Na Fase II, o tempo do teste da garrafa foi suficiente para caracterizar a constante k_2 no modelo de 1ª ordem paralela, possibilitando a melhor representação do decaimento do CRL, subsidiando a sua aplicação, tendo em vista que a água em estudo contém parcelas de compostos inorgânicos e orgânicos. Vários autores já relataram esse comportamento de duas fases de decaimento (QUALLS e JONHSON, 1983; KIÉNÉ, 1998; VIEIRA et al., 2004), embora a duração de cada fase varie significativamente de estudo para estudo, devido à ligação direta com as características da água.

Foi observado nos quatros cenários, que a água leva um determinado tempo para chegar até os reservatórios, sendo assim apresentando valores de concentração de cloro zero durante esse período inicial.

5 DISCUSSÃO

A pesquisa realizada nos reservatórios de distribuição de água do SAACG foi decorrente da necessidade de verificar a influência desses reservatórios no processo de degradação da qualidade da água. Neste estudo, foi tomado como parâmetro de análise o cloro residual livre, substância que garante a qualidade sanitária da água, minimizando, até mesmo erradicando, doenças de veiculação hídrica.

Os reservatórios R9, R5 e R4 foram escolhidos por apresentarem diferentes regimes de operação e de demanda, capacidade de armazenamento e distintos sistemas adutores. Além disso, Nascimento et al. (2016) relatam que, só no sistema adutor de água tratada até a chegada no reservatório R5, as concentrações de CRL chegam a decair cerca de 40%, valor este que pode aumentar significativamente após a passagem pelo sistema de reservação, reforçando a necessidade do estudo da degradação da qualidade da água nos reservatórios.

Em princípio, foi realizado o monitoramento de CRL na saída dos reservatórios estudados, revelando a conformidade em relação às concentrações mínima e máxima recomendadas pela Portaria 2914/2011 do MS sendo verificado que, em alguns dias de análise, esses valores foram acima do máximo recomendado. Porém, em um dia de análise no reservatório R9 foram observados valores acima de 5,0 mgCl₂/L que é o máximo permitido pela Portaria, evidenciando o emprego de dosagens elevadas de cloro na estação de tratamento de água, tendo em vista que não há recloração em nenhum dos reservatórios estudados.

O decaimento de CRL em sistemas de distribuição, neste caso nos reservatórios, se dá principalmente por reações do cloro com substâncias orgânicas e inorgânicas presentes na água (VIEIRA et al., 2004; BELEZA, 2005; NASCIMENTO, 2016; NASCIMENTO et al., 2016). Essas reações são representadas nos modelos por constantes cinéticas.

Em ambas as fases, foi verificado um bom ajuste dos modelos apresentando coeficientes de correlação fortes, acima de 0,96. No entanto, para a Fase I, o modelo de 1ª ordem paralela apresentou bons coeficientes de correlação, porém, os coeficientes k_1 e k_2 mostram valores contraditórios desses coeficientes os quais

devem descrever reações rápidas e lentas, respectivamente, pois esse modelo leva em consideração que o decaimento do cloro ocorre em dois estágios distintos, sendo o tempo de teste insuficiente para caracterizar o segundo estágio. No primeiro, a determinação de k_1 exprime a velocidade de decaimento do cloro relacionada às reações rápidas que ocorrem com substâncias inorgânicas presentes na massa de água (por exemplo, amônia e ferro) e no segundo a determinação de k_2 é função de reações com substâncias orgânicas, caracterizando um decaimento mais lento, conforme descrito por Vieira et al. (2004), que sugerem que o estágio inicial dura em média de duas a três horas. Neste trabalho, isso pode ser verificado nas Figuras 39 a 41, onde há um decaimento mais rápido nas primeiras horas do teste e, depois, um decaimento mais lento.

De acordo com os autores citados anteriormente, no estágio de k_2 ainda existe uma fração inorgânica, principalmente o ferro, que reage lentamente, o que significa que essas substâncias não reagiram completamente no primeiro estágio.

A maioria dos softwares de modelagem da qualidade da água só permite o uso de um modelo de 1ª ordem simples para simular o decaimento do cloro. O EPANET 2.0 permite fazer simulações com modelos de 1ª ordem e ordem n, não oferecendo suporte para a realização de simulação usando um modelo de 1ª ordem paralela. Logo, para saber se um modelo de 1ª de ordem simples pode ser usado na simulação da qualidade da água representando um modelo de 1ª ordem paralela, foi feita uma adaptação do coeficiente cinético para simulação, conforme relatado no tópico 4.3. O primeiro passo foi comparar o intervalo de tempo de detenção da água no sistema a ser modelado, obtido pelo modelo hidráulico, com a curva de decaimento do cloro, traçada a partir do teste da garrafa. Como o tempo de detenção do sistema correspondeu ao segundo estágio do teste, então o comportamento do decaimento do cloro foi descrito por k_2 , pois esta é a constante de decaimento que caracteriza a segunda fase. Dentro dessas condições o modelo de 1ª ordem simples pode ser usado apresentando erros insignificantes.

A aplicação de k_2 está relacionada com a fração orgânica presente na água, porém Nascimento et al. (2016) constataram que, em período normal de abastecimento, a parcela orgânica foi de 5%. No entanto, devido ao período de racionamento de água, no serviço de abastecimento de Campina Grande, a fração

orgânica pode ser maior, podendo existir substâncias orgânicas coloidais dispersas que apresentam maiores dificuldades para remoção na ETA. Outra hipótese é que o processo de manutenção dos reservatórios não é feito conforme o tempo de limpeza recomendado (5 em 5 anos), o que pode provocar mudanças na interação entre a água armazenada e a camada de sedimento acumulada no reservatório.

Em estudo realizado por Vieira et al. (2004), em condições controladas de substâncias orgânicas e inorgânicas e concentração inicial de $2,0 \text{ mgCl}_2/\text{L}$, foi verificado que, para o modelo de 1ª ordem paralela o x (fração de matéria) é limitante, o qual para questões operacionais de simulação no EPANET 2.0, foi considerado que, para valores muito baixos de x , optou-se por usar k_2 e para valores muito altos de x optou-se por k_1 . Entretanto, esse valor de concentração inicial de cloro não é aplicável para esta pesquisa, devido à vulnerabilidade do sistema a fatores como idade da rede, falhas de manutenção, vazamentos, entre outros. Para o sistema em estudo é aplicada a dosagem máxima de $5,0 \text{ mgCl}_2/\text{L}$ permitida pela Portaria 2914/2011 do MS. Mesmo levando em consideração essa diferença de concentração inicial, os valores de x refletiram o que Vieira et al. (2004) confirmam em sua pesquisa, onde baixos valores de x usa-se k_2 , que é o coeficiente que se assemelha com o k do modelo de 1ª ordem simples, gerando poucos erros.

A Figura 43 ilustra o comportamento do cloro para os reservatórios R9, R5 e R4 para Fase I utilizando o k médio do modelo de 1ª ordem. A Figura 44, ilustra o comportamento do cloro para Fase I utilizando o k_2 médio do modelo de 1ª ordem paralela. Foi observado na Figura 44 que o tempo de duração do teste da Fase I não foi suficiente para caracterizar o k_2 escolhido através do modelo de 1ª ordem paralela, refletindo em valores zero de concentração de cloro para os reservatórios R9 e R4, e valores entre 0,05 e 0,1 mgCl_2/L para R5. Os gráficos ilustrados pelas Figuras 45 e 46 representam os cenários 3 e 4, demonstrando uma conformidade para os modelos de 1ª ordem simples e 1ª ordem paralela para a Fase II.

O regime de operação distinto para os reservatórios R9, R5 e R4 e suas demandas correspondentes, interferem diretamente nas curvas dos modelos. O reservatório R5 apresenta sua curva com valores de CRL mais elevados e oscilação devido à sua operação como poço de sucção, renovando sua água constantemente por conta de sua demanda. Os reservatórios R9 e R4 são reservatórios de

capacidade maior e que apresentam características unicamente de reservatório de acumulação e distribuição, apresentando similaridade nas suas curvas de comportamento do CRL, entretanto o R4 apresenta uma curva com o comportamento inferior, por ser alimentado pelo R5, cujas águas sofrem decaimento anterior de cloro.

O uso de modelos de simulação da qualidade da água torna-se uma ferramenta fundamental para o gerenciamento da água nos sistemas de abastecimento. Há anos, que o modelo de 1ª ordem simples é o mais utilizado devido à sua simplicidade de aplicação, simplicidade computacional e bons resultados gerados, no entanto, neste trabalho, foi verificado que o modelo de 1ª ordem paralela pode fornecer informações interessantes quanto à característica da água, tanto no comportamento do cloro, como em outras, frações orgânicas precursoras, por exemplo, que precisam ser melhor investigadas, até para que o processo de produção de água de beber seja mais eficiente.

A implantação desses modelos pela concessionária contribuiria para gerar mais informações a respeito do sistema de abastecimento, principalmente quando se trata da qualidade da água e do risco associado ao seu fornecimento.

6 CONCLUSÕES

Ao longo das redes de distribuição várias mudanças ocorrem na qualidade da água, e muitas dessas mudanças ainda não apresentam respostas e são subestimadas do ponto de vista da prevenção no âmbito da gestão da qualidade da água dos sistemas de abastecimento.

A partir desta pesquisa foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Os resultados revelaram que o processo de degradação de CRL no sistema como um todo é intenso, deixando os usuários vulneráveis, principalmente aqueles abastecidos por reservatórios em série e distantes do reservatório inicial de água tratada (R0).
- A melhor compreensão da cinética de decaimento do cloro nos reservatórios proporcionará aos gestores de abastecimento de água um melhor cumprimento dos requisitos regulamentares, bem como a melhoria da qualidade da água fornecida ao cliente, gerando o aumento da sua satisfação.
- Nos reservatórios o decaimento do cloro foi caracterizado por duas etapas: uma etapa inicial de reações rápidas com substâncias mais reativas, seguida de uma etapa mais lenta, devida a reações entre o desinfetante com espécies menos reativas.
- Como a maioria dos softwares de modelagem da qualidade da água ainda são muito limitados a modelos de 1ª ordem simples, é importante avaliar os erros associados antes de fazer adaptações com outros modelos, como o proposto nessa pesquisa.

7 RECOMENDAÇÕES

- Testes da garrafa com durações maiores precisam ser realizados em outros reservatórios e setores do SAACG para investigar a cinética de decaimento do cloro residual livre.
- Estudos mais detalhados devem ser feitos para caracterizar a água do SAACG com a determinação das frações de substâncias orgânicas e inorgânicas que demandam cloro residual livre, em períodos de abastecimento normal e de racionamento.

REFERÊNCIAS

AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. Açudes monitorados. Disponível em: <
<http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/volumesAcudes.do?metodo=preparaUltimosVolume>
 sPorBacia >. Acesso em: 29 de março de 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Atlas Brasil. Abastecimento Urbano de Água. Disponível em:
<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/analise/VerCroqui.aspx?arq=1434>. Acesso em: 18 fev. 2017.

ALBUQUERQUE, A. A. **Análises e Métodos de Otimização para Eficiência Energética de Estações Elevatórias em Sistemas de Abastecimento de Água.** Tese de Doutorado. Programa Institucional de Doutorado Temático em Recursos Naturais da UFCG. Campina Grande, 2007.

BELEZA, J. M. B. B. **Simulação das concentrações de cloro residual e trihalometanos em redes de distribuição de água para consumo humano.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005.

BELOHLAV, L.R.; MCBEE, E.T. Discovery and Early Work In Chlorine: Its Manufacture, Properties and Uses. Van Nostrand Reinhold, New York, 1966. ACS Monograph No. 154 (J. Sconce, ed.).

BOCCELLI D. L., TRYBY M. E., UBER J. G., SUMMERS R. S. A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions. *Water Research* 37:2654–2666. (2003).

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria Nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Diário Oficial da União, Brasília, DF. 14 dez. 2011

CLARK, R., ROSSMAN L. A, WYNER L. J. (1995). Modeling distribution system water quality: Regulatory implications. **Journal of water resources planning and management.** V. 121, p. 423-428.

CLARK, R., SIVAGANESAN, M. Predicting Chlorine Residuals in Drinking Water: Second Order Model. **journal of water resources planning and management** / march/april 2002.

CLARK, R.; GRAYMAN, W.; MALES, R. M; HESS, A. Modeling contaminant propagation in drinking water distribution systems. **Journal of Environmental Engineering**, v. 119, n. 2, p.349-364, 1993.

CLARK, R.M.; GOODRICH, J.A.; WYMER, L.J. Effects of the distribution system on drinking water quality. **J. Water SRT - Aqua.** v. 42 n. 1, p. 30-38, 1993.

COELHO, M. M. L. P.; LIBÂNIO, M. Reservação. In: HELLER, L., LÚCIO DE PAULA, V. (orgs). **Abastecimento de água para consumo humano**. Capítulo 13, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, Editora UFMG, 2006.

DANIEL, L. A. **Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável**. São Carlos: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB, 2001.

DANIELI, R. D., GASTALDINI, M. C., BARROSO, L. B. **Modelagem do cloro residual em redes de distribuição – Aplicação ao sistema de abastecimento de Santa**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH. Vol 11. 4: 201{208. 2006.

DEBORDE, M., VON GUNTEN, U. Reactions of chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment—Kinetics and mechanisms: A critical review. Water Res. 42, 13–51. doi:10.1016/j.watres.2007.07.025. 2008.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A. (2005). **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2ed. São Carlos: RIMA, p. 1152-1312.

EPA (Environmental Protection Agency). 2002. Permeation and Leaching. Disponível em: < <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/permeationandleaching.pdf> >. Acesso em: 06 de fevereiro de 2017.

FIGUEIREDO, D. M. D. **Modelagem do decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água**. Técnico Lisboa. Maio, 2014.

FISHER, I.; KASTL, G.; SATHASIVAN, A. Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems. **Water Research**, v. 45, n. 16, p. 4896-4908, 2011.

GUIMARÃES, A. J. A.; CARVALHO, D. F. de; SILVA, L. D. B. da. Saneamento básico. S. I., 2007, 9 p. Apostila do Instituto de Tecnologia/Departamento de Engenharia – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/Apostila%20IT%20179/Cap%204%20parte%203.pdf> . Acesso em: 15 jan. 2017.

HAAS C. N., KARRA S. B. Kinetics of Wastewater Chlorine Demand Exertion. **Journal WPCF**, 56, 170-173. 1984.

HART, FREDERICK L.; WHEELER, WAYNE A.; DALY, WILLIAM J. (1992). Chlorine Residual Distribution in a Municipal Water Network Presented at the NEWWA Computer Symposium. Worcester. EUA.

HELLER, L., **Abastecimento de água, sociedade e ambiente**. In: HELLER, L., LÚCIO DE PAULA, V. (orgs). Abastecimento de água para consumo humano. Capítulo 1, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, Editora UFMG, 2006.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010 – Características Gerais da População. Resultados da Amostra**. IBGE, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

KIÉNÉ, L., LU, W., LÉVI, Y. Relative importance of the phenomena responsible for chlorine decay in drinking water distribution systems. **Water Science and Technology**, v. 38, n. 6, p. 219-227, 1998

LEAL, E.S. **Modelagem da degradação de cloro residual livre em sistemas de adução de água de abastecimento de porte médio**. UFCG. 106p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012

MENESES, R. A. **Diagnóstico operacional de sistemas de abastecimento de água: o caso de Campina Grande**. 2011. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

MEYER, S. T. **O Uso de Cloro na Desinfecção de Águas, a Formação de Trihalometanos e os Riscos Potenciais à Saúde Pública**. Caderno. Saúde Pública, vol. 10 (1): 99-110, jan/mar. 1994.

MORAES, F. A. **Calibração de modelo de decaimento de cloro aplicado a setor de rede de distribuição de água**. Dissertação (Mestrado em engenharia hidráulica e sanitária), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MUNAVALLI, G.R., KUMAR M. S. M. Water quality parameter estimation in steady-state distribution system. **Journal of water resources planning and management**. Vol. 129(2):124{134. 2003.

NASCIMENTO, R.S. **modelo conceitual para a gestão da qualidade da água em sistemas de abastecimento de médio porte**. 2007. 137f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2016.

NASCIMENTO, R.S.; CURI, R.C.; CURI, W.F.; OLIVEIRA, R.; SANTANA, C.F.D.; MEIRA, C.M.B.S.. **Simulação de alterações numa ETA convencional de porte médio para a produção de água segura**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, p. 439-450, 2016.

OHARA, C. et al. Metodologia e aplicativo computacional para definição de limites operacionais de segurança dos reservatórios do sistema adutor metropolitano de São Paulo. **Revista Saneas**, Vol. 01, nº 14, outubro de 2002.

PIEREZAN, M.L. **Monitoramento contínuo do residual do Cloro em sistema de distribuição de água para abastecimento**. UFMS.150p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.

POWELL, J. C.; HALLAM, N. B.; WEST, J. R.; FORSTER. C. F.; SIMMS, J. Factor which control bulk chlorine decay rates. **Water Research**, v. 34, p. 117-126, 2000.

QUALLS, R. G., JOHNSON, J. D. Kinetics of short-term consumption of chlorine by fulvic acid. **Environ. Sci. & Technol.** 17, 692–698. 1983.

RANGEL JUNIOR, A. G.; SOUSA, C. M. **Campina Grande hoje e amanhã**. [Livro Eletrônico] - Campina Grande: EDUEPB, 2013. Disponível em: <www.eduepb.uepb.edu.br> acesso em: 06 dez 2016.

ROSSIN, A. C., 1987. Desinfecção. In: Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água (Tratamento de Água), Vol. 2, São Paulo: CETESB/ASCETESB.

ROSSMAN L., BOULOS P. Numerical methods for modeling water quality in distribution systems: A comparison. **Journal of water resources planning and management**.122:137-146.1996.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 user's manual**: U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2.00. 12. User's Manual**. U.S. Environmental Protection Agency – EPA, Cincinnati, Ohio, 2008.

SALGADO, S. R. T. **Estudo dos parâmetros do decaimento do cloro residual em sistema de distribuição de água tratada considerando vazamento**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SANTOS, W. B. **Modelagem da degradação de cloro residual livre na rede de distribuição de água da cidade de Campina Grande – PB**. UFCG. Campina Grande, março 2017.

SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. **Manual de análise físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias**. Campina Grande: O Autor, 200. 266p.

TOMINAGA, M. Y., MIDIO A. F. Exposição humana a trihalometanos presentes em água tratada. **Revista Saúde Pública**, 33(4), 413-21. 1999.

TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de Água**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - 4ª edição - São Paulo, 2006.

USEPA. **Distribution System Indicators of Drinking Water Quality**. Total Coliform Rule White Paper. HDR Engineering, Inc.The Cadmus Group, Inc. U.S. EPA Office of Groundwater and Drinking Water. December 2006.

VASCONCELOS, J.; BOULOS, P.; GRAYMAN, W.; KIENE, L.; WABLE, O.; BISWAS, P.; BAHRI, A.; ROSSMAN, L.; CLARK, R.; GOODRICH, J.. Characterization and Modeling of Chlorine Decay in Distribution Systems. **AWWARF**.1996.

VIEIRA P., COELHO S.T. **Practical conditions for the use of a first order chlorine decay model in water supply**. Proc. Computing and Control for the Water Industry. 2003.

VIEIRA, P., COELHO, S. T., LOUREIRO, D., **Accounting for the influence of initial chlorine concentration, TOC, iron and temperature when modelling**

chlorine decay in water supply. JOURNAL OF WATER SUPPLY: RESEARCH AND TECHNOLOGY – AQUA. 2004.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Disinfectants and disinfectant by-product. WHO: Geneva, 2004. (Environmental health criteria 216). Disponível em <http://www.who.int/ipcs/publications/ehc/ehc_216/en/>, acesso em 09 mar. 2017.